

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Sumić Luka  
0035122465

Zagreb, 2012

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Bojan Jerbić

Sumić Luka

0035122465

Zagreb, 2012

## **ZADATAK**

## SAŽETAK

U ovom diplomskom radu biti će riješen problem postolja i sučelja za dvoagentni robotski neurokirurški sustav, vodeći pri tome računa o svim zahtjevima i potrebama u operacijskoj dvorani, te ponajviše o samoj sigurnosti pacijenata i liječnika koji se nalaze u okružju sustava. Roboti koji će se koristiti za rješavanje problema su Fanuc LR Mate 200iC5L (kasnije će biti implementiran KUKA KR 6 R900 sixx) i KUKA LBR4 dok će od alata i opreme biti korišteni markerska pločica, kamera sa laserskim senzorom, stereovizijski sustav, kirurška bušilica, kateter, kalibracijska kugla i kalibracijska igla. Prije samog konstruiranja nosećega postolja, potrebno je izraditi precizne modele robota i alata koji će se koristiti, te usporediti sa stvarnim modelima robota. Za to će se koristiti programski paket DELMIA V5R16, koji u svojim sučeljima nudi sve alate potrebne za projektiranje i verificiranje jednog takvog sustava. Nakon definiranja robota i alata, potrebno je ispitati različite varijante montiranja robota te odabrati onu sa najboljim putanjama kretanja alata, koje omogućavaju najlakši pristup ciljanom području zahvata, imajući pri tome u vidu da roboti ne smiju smetati ili onemogućiti medicinsko osoblje u izvođenju njihovih zadataka prilikom operativnog zahvata. Tek nakon što su definirane moguće pozicije robota i alata koji će se koristiti tijekom zahvata, moguće je pristupiti projektiranju nosive konstrukcije i sučelja robota. Prilikom projektiranja treba pripaziti na neke važnije značajke kao što su krutost cijele konstrukcije (svesti vibracije na što je manje moguće), o integraciji sustava u okružje (učvršćivanje postolja sa čvrstom podlogom, povezivanje sa operacijskim stolom), o prostoru djelovanja robota i medicinskog osoblja (da dijelovi sustava ne smetaju robotima i medicinskom osoblju prilikom izvođenja zadataka kao da i roboti međusobno ne ometaju jedan drugoga ili medicinsko osoblje), o laganoj manipulativnosti sustavom (da ga se može lako, brzo i jednostavno dovesti do operacijskog stola, spojiti sa njime i nakon obavljanja zahvata odvojiti od stola i maknuti) te o ostaloj dodatnoj opremi bez koje sustav ne bi mogao funkcionalno obavljati predviđene operativne zadaće (ugradnja upravljačkih jedinica robota, sučelja za upravljanje robotskim sustavima, pročišćivači zraka, dodatna rasvjeta, priključci za struju, vodu i zrak).



# SADRŽAJ

<b>ZADATAK.....</b>	<b>III</b>
<b>SAŽETAK .....</b>	<b>IV</b>
<b>SADRŽAJ .....</b>	<b>V</b>
<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>VII</b>
<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>IX</b>
<b>POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE.....</b>	<b>X</b>
<b>POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA .....</b>	<b>XI</b>
<b>IZJAVA.....</b>	<b>XII</b>
<b>ZAHVALA.....</b>	<b>XIII</b>
<b>1. UVOD .....</b>	<b>2</b>
<b>2. PRIMJENA ROBOTA U NEUROKIRURGIJI<sup>[2]</sup> .....</b>	<b>3</b>
2.1. POVIJEST ROBOTA U NEUROKIRURGIJI .....	3
<b>3. OPREMA ROBOTSKOG NEUROKIRURŠKOG SUSTAVA.....</b>	<b>5</b>
3.1. FANUC LR MATE 200iC5L <sup>[3]</sup> .....	6
3.1.1. R-30iA Mate upravljačka jedinica.....	8
3.2. KUKA KR 6 R900 SIXX <sup>[4]</sup> .....	9
3.2.1. KR C4compact upravljačka jedinica.....	11
3.3. KUKA LBR4 <sup>[4]</sup> .....	13
3.3.1. KR C2 lr upravljačka jedinica.....	15
3.4. ALATI I SENZORI .....	17
3.4.1. Markerska pločica.....	18
3.4.2. Kamera sa laserskim senzorom.....	18
3.4.3. Stereovizijski sustav .....	20
3.4.4. Kirurška bušilica.....	22
3.4.5. Kateter.....	22
3.4.6. Kalibracijska kugla .....	23
3.4.7. Kalibracijska igla.....	23
<b>4. IZRADA MODELA ROBOTA, ALATA I OPREME .....</b>	<b>24</b>
4.1. ISPITIVANJE MODELA ROBOTA FANUC LR MATE 200iC5L .....	28
4.2. ISPITIVANJE MODELA ROBOTA KUKA LBR4 .....	33
4.3. ISPITIVANJE MEĐUSOBNE POZICIJE ROBOTA I ALATA .....	36
<b>5. ISPITIVANJE TRAJEKTORIJA KRETANJA ALATA .....</b>	<b>39</b>
5.1. SIMULACIJA I ANALIZA OPERATIVNOG ZAHVATA.....	48
<b>6. DIZAJN I KONSTRUKCIJA MOBILNOG POSTOLJA ROBOTA .....</b>	<b>51</b>
6.1. VARIJANTE POSTAVLJANJA ROBOTA .....	52
6.1.1. Stolna postolja.....	52
6.1.2. Viseća postolja .....	52
6.1.3. Zidno (konzolno) postolje.....	53
6.2. DIZAJN I KONSTRUKCIJA POSTOLJA.....	54
6.2.1. Okvir postolja.....	56
6.2.2. Transport i manipulacija postolja sa robotima.....	57
6.2.3. Ostali elementi sustava.....	59
6.3. PRORAČUN ČVRSTOĆE I VLASTITIH FREKVENCIJA POSTOLJA.....	59
6.4. RASPORED I DIMENZIJE ELEMENATA DVOAGENTNOG ROBOTSKOG NEUROKIRURŠKOG SUSTAVA.....	62

<b>7. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>65</b>
<b>8. LITERATURA .....</b>	<b>66</b>

## POPIS SLIKA

SLIKA 3.1 <i>LR MATE 200iC5L</i> .....	6
SLIKA 3.2 <i>DIMENZIJE I RADNI PROSTOR ROBOTA LR MATE 200iC/5L</i> .....	7
SLIKA 3.3 <i>UPRAVLJAČKA JEDINICA R-30iA MATE</i> .....	8
SLIKA 3.4 <i>UPRAVLJAČKO SUČELJE</i> .....	9
SLIKA 3.5 <i>DIMENZIJE UPRAVLJAČKE JEDINICE R-30iA MATE (M ≈ 55 KG)</i> .....	9
SLIKA 3.6 <i>KR 6 R909 SIXX</i> .....	10
SLIKA 3.7 <i>DIMENZIJE I RADNI PROSTOR ROBOTA KR 6 R900 SIXX</i> .....	11
SLIKA 3.8 <i>UPRAVLJAČKA JEDINICA KR C4 COMPACT</i> .....	12
SLIKA 3.9 <i>UPRAVLJAČKO SUČELJE KUKA SMARTPAD</i> .....	12
SLIKA 3.10 <i>DIMENZIJE UPRAVLJAČKE JEDINICE KR C4 COMPACT</i> .....	13
SLIKA 3.11 <i>KUKA LBR4</i> .....	14
SLIKA 3.12 <i>REDUNDANTNOST ROBOTA LBR4</i> .....	14
SLIKA 3.13 <i>DIMENZIJE I RADNI PROSTOR ROBOTA LBR4</i> .....	15
SLIKA 3.14 <i>UPRAVLJAČKA JEDINICA KR C2 LR</i> .....	16
SLIKA 3.15 <i>UPRAVLJAČKO SUČELJE KPC</i> .....	16
SLIKA 3.16 <i>DIMENZIJE UPRAVLJAČKE JEDINICE KR C2 LR</i> .....	17
SLIKA 3.17 <i>MARKERSKA PLOČICA</i> .....	18
SLIKA 3.18 <i>ALAT KAMERA SA LASERSKIM SENZOROM</i> .....	18
SLIKA 3.19 <i>KAMERA BASLER SCA640-120FC</i> .....	19
SLIKA 3.20 <i>OBJEKTIV TAMRON 12VM1040ASIR</i> .....	19
SLIKA 3.21 <i>LASERSKI SENZOR ACUITY AR700</i> .....	20
SLIKA 3.22 <i>STEREOVIZIJSKI SUSTAV</i> .....	20
SLIKA 3.23 <i>KAMERA BASLER SCA1390-17FC</i> .....	21
SLIKA 3.24 <i>OBJEKTIV EDMUND OPTICS MACRO ZOOM</i> .....	21
SLIKA 3.25 <i>KIRURŠKA BUŠILICA</i> .....	22
SLIKA 3.26 <i>KATETER</i> .....	22
SLIKA 3.27 <i>KALIBRACIJSKA KUGLA</i> .....	23
SLIKA 3.28 <i>KALIBRACIJSKA IGLA</i> .....	23
SLIKA 4.1 <i>RJEŠAVANJE KINEMATIKE ROBOTA POMOĆU INVERZNE KINEMATSKE METODE</i> .....	24
SLIKA 4.2 <i>UČENJE ROBOTA POMOĆU PROSTORNIH MARKERA (TAG-OVA)</i> .....	25
SLIKA 4.3 <i>UČENJE ROBOTA POMOĆU POMAKA ZGLOBOVA (JOINT)</i> .....	26
SLIKA 4.4 <i>UČENJE ROBOTA POMOĆU KOORDINATNOG SUSTAVA (CARTESIAN)</i> .....	26
SLIKA 4.5 <i>PROFIL KRETANJA ROBOTA</i> .....	27
SLIKA 4.6 <i>POČETNI POLOŽAJ ROBOTA LR MATE 200iC5L</i> .....	28
SLIKA 4.7 <i>ISPRUŽENI POLOŽAJ ROBOTA LR MATE 200iC5L</i> .....	29
SLIKA 4.8 <i>PROIZVOLJNI POLOŽAJ ROBOTA LR MATE 200iC5L</i> .....	30
SLIKA 4.9 <i>POLOŽAJ CAD MODELA ROBOTA AKO SE OS J2 ZAKRENE ZA 45°</i> .....	31
SLIKA 4.10 <i>POLOŽAJ STVARNOG MODELA ROBOTA AKO SE OS J2 ZAKRENE ZA 45°</i> .....	31
SLIKA 4.11 <i>PROIZVOLJNI POLOŽAJ ROBOTA LR MATE 200iC5L NAKON KOMPENZACIJE OSI J3</i> .....	32
SLIKA 4.12 <i>ISPRUŽENI POLOŽAJ ROBOTA LBR4</i> .....	33
SLIKA 4.13 <i>PRVI PROIZVOLJNI POLOŽAJ ROBOTA LBR4</i> .....	34
SLIKA 4.14 <i>DRUGI PROIZVOLJNI POLOŽAJ ROBOTA LBR4</i> .....	35
SLIKA 4.15 <i>RASPORED RESURSA I PRODUKATA U DELMIA-I</i> .....	36
SLIKA 4.16 <i>PRVI MEĐUSOBNI POLOŽAJ ROBOTA U KOJEM IM SE DODIRUJU VRHOVI ALATA</i> .....	37
SLIKA 4.17 <i>DRUGI MEĐUSOBNI POLOŽAJ ROBOTA U KOJEM IM SE DODIRUJU VRHOVI ALATA</i> .....	38
SLIKA 5.1 <i>TRAJEKTORIJE KRETANJA ALATA</i> .....	39
SLIKA 5.2 <i>POLOŽAJI PACIJENTA NA KOJIMA KOJE ĆE SE ISPITIVATI PUTANJE KRETANJA ALATA</i> .....	39
SLIKA 5.3 <i>POZICIJA I ORIJENTACIJA TCP-A ALATA NA PACIJENTU</i> .....	40
SLIKA 5.4 <i>OBAVIJEST O DOSEŽNOSTI TOČKE U PROSTORU</i> .....	40
SLIKA 5.5 <i>POZICIONIRANJE PACIJENTA, TRAJEKTORIJA I PROSTORNIH MARKERA</i> .....	41
SLIKA 5.6 <i>DEFINIRANJE POZICIJE I ORIJENTACIJE MARKERA POMOĆI TAG TRANSFORMATION EDITORA</i> .....	41
SLIKA 5.7 <i>EDITOR ZA PROSTORNU MANIPULACIJU ROBOTOM I UČENJE</i> .....	42
SLIKA 5.8 <i>PUTANJA KRETANJA TCP-A ALATA ROBOTA KUKA PO PROSTORU DOK JE PACIJENT U LEŽEĆEM POLOŽAJU</i> ..	43
SLIKA 5.9 <i>PUTANJA KRETANJA TCP-A ALATA ROBOTA FANUC PO PROSTORU DOK JE PACIJENT U LEŽEĆEM POLOŽAJU</i> ..	43
SLIKA 5.10 <i>SPECIFIKACIJSKO STABLO</i> .....	44

SLIKA 5.11 ODSUPANJE PUTANJE TCP-A OD ZADANE TRAJEKTORIJE .....	44
SLIKA 5.12 TABLIČNI PRIKAZ TEACH EDITORA .....	45
SLIKA 5.13 DEFINIRANJE PUTANJE TCP-A PRILIKOM IZVOĐENJA POJEDINE OPERACIJE .....	45
SLIKA 5.14 PUTANJA TCP-A BEZ ODSUPANJA OD ZADANE TRAJEKTORIJE.....	46
SLIKA 5.15 POZICIJA KRANIJA ZA RAZLIČITE POLOŽAJE PACIJENTA .....	46
SLIKA 5.16 PUTANJA KRETANJA TCP-A ALATA ROBOTA KUKA PO PROSTORU DOK JE PACIJENT U POLOŽAJU OD 30° ...	47
SLIKA 5.17 PUTANJA KRETANJA TCP-A ALATA ROBOTA FANUC PO PROSTORU DOK JE PACIJENT U POLOŽAJU OD 30° ..	47
SLIKA 5.18 DOLAZAK FANUC-A IZNAD KALIBRACIJSKE PLOČICE, LOKALIZACIJA I PORAVNAVANJE.....	49
SLIKA 5.19 POSTAVLJANJE KUGLE U VRH ŠILJKA MARKERSKE PLOČICE I KALIBRACIJA STEREOVIZIJSKIM SUSTAVOM .....	49
SLIKA 5.20 POZICIONIRANJE FANUC-A NA MJESTO OPERACIJE .....	49
SLIKA 5.21 KUKA UZIMA BUŠILICU I BUŠI LUBANJU.....	50
SLIKA 5.22 KUKA UZIMA KATETER I UMEČE GA KROZ VODILICU U GLAVU PACIJENTA.....	50
SLIKA 5.23 KUKA I FANUC SE ODMIČU OD KATETERA.....	50
SLIKA 6.1 PODRUČJE SMJEŠTAJA ROBOTSKOG SUSTAVA OKO OPERACIJSKOG STOLA.....	51
SLIKA 6.2 STOLNO POSTOLJE .....	52
SLIKA 6.3 VISEĆE POSTOLJE .....	53
SLIKA 6.4 ZIDNO (KONZOLNO) POSTOLJE .....	53
SLIKA 6.5 POLOŽAJ POSTOLJA IZA OPERACIJSKOG STOLA I RAZMJESTAJ ROBOTA NA POSTOLJU .....	54
SLIKA 6.6 POLOŽAJ POSTOLJA PORED OPERACIJSKOG STOLA I RAZMJESTAJ ROBOTA NA POSTOLJU .....	55
SLIKA 6.7 POLOŽAJ POSTOLJA PORED OPERACIJSKOG STOLA I NOVI RAZMJESTAJ ROBOTA NA POSTOLJU .....	55
SLIKA 6.8 PROFILI INOX CIJEVI ZA OKVIR POSTOLJA .....	56
SLIKA 6.9 OKVIR POSTOLJA SA TABLAMA .....	56
SLIKA 6.10 REXROTHOV HIDRAULIČKI CILINDAR Ø32 <sup>[9]</sup> .....	58
SLIKA 6.11 ENERCAPOVA HIDRAULIČKA RUČNA PUMPA <sup>[9]</sup> .....	58
SLIKA 6.12 NOSAČI I KUĆIŠTE HIDRAULIČKIH CILINDARA .....	58
SLIKA 6.13 MOBILNO POSTOLJE .....	59
SLIKA 6.14 POJEDNOSTAVLJENI OBLIK POSTOLJA SA SILAMA I OSLONCIMA .....	60
SLIKA 6.15 VON MISESOVA NAPREZANJA .....	60
SLIKA 6.16 RASPORED DEFORMACIJA NA POSTOLJU .....	60
SLIKA 6.17 RASPORED MASA NA POSTOLJU .....	61
SLIKA 6.18 POSTOLJE PRI FREKVENCIJI OD 86,075 Hz.....	62
SLIKA 6.19 ROBOTSKI NEUROKIRURŠKI SUSTAV .....	63
SLIKA 6.20 POLOŽAJ ROBOTSKOG NEUROKIRURŠKOG SUSTAVA UNUTAR OPERACIJSKE DVORANE.....	64

## POPIS TABLICA

TABLICA 3.1 TEHNIČKE KARAKTERISTIKE ROBOTA LR MATE 200iC5L.....	7
TABLICA 3.2 TEHNIČKE KARAKTERISTIKE ROBOTA KR 6 R900 SIXX.....	10
TABLICA 3.3 TEHNIČKE KARAKTERISTIKE ROBOTA LBR4 .....	15
TABLICA 3.4 TEHNIČKE KARAKTERISTIKE BASLER-OVE KAMERE SCA640-120FC .....	19
TABLICA 3.5 TEHNIČKE KARAKTERISTIKE TAMRON-OVOG OBJEKTIVA 12VM1040ASIR .....	19
TABLICA 3.6 TEHNIČKE KARAKTERISTIKE ACUITY LASERSKOG SENZORA AR700 .....	20
TABLICA 3.7 TEHNIČKE KARAKTERISTIKE BASLER-OVE KAMERE SCA1390-17FC .....	21
TABLICA 3.8 TEHNIČKE KARAKTERISTIKE EDMUND OPTICS OBJEKTIVA MACRO ZOOM .....	21
TABLICA 4.1 USPOREDBA POZICIJE I ORIJENTACIJE TCP-A CAD MODELA I STVARNOG ROBOTA LR MATE 200iC5L U POČETNOM POLOŽAJU .....	28
TABLICA 4.2 USPOREDBA POZICIJE I ORIJENTACIJE TCP-A CAD MODELA I STVARNOG ROBOTA LR MATE 200iC5L U ISPRUŽENOM POLOŽAJU .....	29
TABLICA 4.3 USPOREDBA POZICIJE I ORIJENTACIJE TCP-A CAD MODELA I STVARNOG ROBOTA LR MATE 200iC5L U PROIZVOLJNO ODABRANOM POLOŽAJU .....	30
TABLICA 4.4 USPOREDBA POZICIJE I ORIJENTACIJE TCP-A CAD MODELA I STVARNOG ROBOTA LR MATE 200iC5L U PROIZVOLJNO ODABRANOM POLOŽAJU NAKON KOMPENZACIJE OSI J3 .....	32
TABLICA 4.5 USPOREDBA POZICIJE I ORIJENTACIJE TCP-A CAD MODELA I STVARNOG ROBOTA LBR4 U ISPRUŽENOM POLOŽAJU .....	33
TABLICA 4.6 USPOREDBA POZICIJE I ORIJENTACIJE TCP-A CAD MODELA I STVARNOG ROBOTA LBR4 U PRVOM PROIZVOLJNO ODABRANOM POLOŽAJU .....	34
TABLICA 4.7 USPOREDBA POZICIJE I ORIJENTACIJE TCP-A CAD MODELA I STVARNOG ROBOTA LBR4 U DRUGOM PROIZVOLJNO ODABRANOM POLOŽAJU .....	35
TABLICA 4.8 IZMJERENE VRIJEDNOSTI POZICIJE I ORIJENTACIJE DODIRA TCP-A ALATA CAD MODELA I STVARNIH MODELA ROBOTA ZA PRVI POLOŽAJ .....	37
TABLICA 4.9 IZMJERENE VRIJEDNOSTI POZICIJE I ORIJENTACIJE DODIRA TCP-A ALATA CAD MODELA I STVARNIH MODELA ROBOTA ZA DRUGI POLOŽAJ .....	38
TABLICA 6.1 VLASTITE FREKVENCije SUSTAVA .....	61

## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

1. Postolje robotskog neurokirurškog sustava
2. Okvir postolja
3. Hidraulički transportni sustav
4. Kućište
5. Distancer
6. Ploča 1
7. Ploča 2
8. Ploča 3
9. Ploča 4

## POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA

### *Mjerne jedinice:*

Oznaka	Jedinica	Opis
s	m	put
t	s	vrijeme
m	kg	masa
a	mm/s <sup>2</sup>	akceleracija
v	m/s	brzina
α	°	kut
M	Nm	moment
I	kgm <sup>2</sup>	moment inercije
f	Hz	frekvencija

### *Oznake:*

CT (*Computed Tomography*) – Računalna tomografija

MRI (*Magnetic Resonance Imaging*) – Magnetna rezonancija

iMRI (*interventional Magnetic Resonance Imaging*) – Interventna magnetna rezonancija

fMRI (*functional Magnetic Resonance Imaging*) – Funkcionalna magnetna rezonancija

FDA (*Food and Drug Administration*) – Agencija za hranu i lijekove

TCP (*Tool Center Point*) – Vrh alata

I/O (*Input/Output*) – Ulazni i izlazni signali

CNC (*Computer Numerical Control*) – Numerički upravljani alatni strojevi

PLC (*Programmable Logic Controller*) – Programibilni logički kontroler

SSG – Stupanj slobode gibanja

CAD (*Computer-aided design*) – Konstruiranje pomoću računala

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija na fakultetu te stručnu literaturu i raspoloživu opremu.

Luka Sumić

---



## ZAHVALA

Ovom prilikom želim se zahvaliti:

Mentoru prof. dr. sc. Bojanu Jerbiću na savjetima, pomoći i suradnji kako tokom studija, tako i za vrijeme izrade diplomskog rada.

Djelatnicima Katedre za projektiranje izradbenih i montažnih sustava i mojim dragim prijateljima Petru, Tomislavu, Denisu, Marku i Bojanu na korisnim savjetima i ugodnom druženju tijekom izrade diplomskog rada.

Također se želim posebno zahvaliti prof. dr. sc. Gojku Nikoliću koji mi je svojim znanjem, iskustvom i savjetima puno pomogao u izradi ovog rada.

Svim prijateljima i kolegama koji su mi pomogli tijekom studija.

Mojoj supruzi Martini koja je bila velika potpora tijekom studija.

Mojim roditeljima koji su mi omogućili školovanje i što sam u mogućnosti napisati ovaj rad. Hvala im na velikom strpljenju, odricanju i potpori, kako financijskoj tako i moralnoj, koju su mi poklonili tokom mog školovanja i studiranja.

*Tri zakona robotike:*

- 1. Robot ne smije naškoditi čovjeku, ili svojom pasivnošću dopustiti da se čovjeku naškodi.*
- 2. Robot mora slušati ljudske naredbe, osim kad su one u suprotnosti s prvim zakonom.*
- 3. Robot treba štititi svoj integritet, osim kad je to u suprotnosti s prvim ili drugim zakonom.*

Isaac Asimov, iz knjige "*Ja, robot*", 1950.

# 1. UVOD

Povijest liječenja gotovo je stara koliko i ljudska povijest. Još u prapovijesno doba postajali su pojedinci (šamani, vračevi) koji su posjedovali sposobnost otklanjanja ljudske boli i liječenja ozljeda i bolesti. Ne tako davno u Saqqarai, u Egiptu, otkriven je grob liječnika po imenu Quar (oko 4300 god.pr.Kr.), u kojemu su pronađeni brončani kirurški instrumenti za rezanje i šivanje koji su se mogli upotrebljavati za delikatne kirurške zahvate kao što je i operacija mozga. Koliko je danas poznato, najstariji pisani dokument posvećen ozljedama glave jest Papirus Edwina Smitha koji je nastao oko 1700 god.pr.Kr. U njemu su opisane i četiri depresivne frakture kranija, sa preporukom da rana ostane otvorena kako bi se lubanjska šupljina nesmetano drenirala, te da se rana obloži otopinom od ljekovitih trava. U Rimskom Carstvu su postajale valetudinarie prve organizirane institucije namijenjene za saniranje rana vojnicima i gladijatorima zadobivenih u borbi. Galen (130 – 210 g.) bilježi svoja iskustva u liječenju ozljeda glave, povezujući po prvi puta u povijesti ozljede mozga sa kontralateralnim parezama i paralizom udova. U 4 st. osnovan je red svetog Benedikta sa misijom liječenja i iscjeljivanja, ali je kroz srednji vijek većina stečenih znanja zanemarena i napuštena<sup>[1]</sup>.

Moderna neurokirurgija kao neovisna disciplina razvila se na prijelazu iz 19 u 20 st. a njenim utemeljiteljem se smatra Harvey Cushing, zbog brojnih doprinosa i inovacija u toj disciplini (posebice u kirurgiji tumora mozga). Još kao student uveo je bilježenje vitalnih znakova tijekom anestezije, učinkovito upotrebljava radiografiju, kreira srebrne kvačice za kontrolu krvarenja, te uvodi u upotrebu aparat za elektrokoagulaciju. On je iz temelja promijenio dotadašnje stavove i razumijevanje o hipofizi, endokrinim bolestima i moždanim tumorima, načinivši sa Baylijem prvu suvremenu klasifikaciju tumora mozga. Također je bitno spomenuti engleskog kirurga Sir Victora Horsleya, koji je bio prvi koji je specijalizirao i potpuno se posvetio neurokirurgiji<sup>[1]</sup>.

Sam koncept robota kao pomoć kirurzima pri izvođenju kompleksnih operacijskih zahvata spominje se već gotovo 40 godina, ali je tek relativno nedavno postao izvediv. U neurokirurgiji roboti su se pojavili prije više od 25 godina, što je čini jednom od prvih grana kirurgije u kojoj se primjenjuju robotski sustavi. Usprkos tome, to područje ostaje i dalje nepoznanica za većinu neurokirurga, ali je nužno uvođenje robota u operacijske sale jer zahtijevana preciznost kojom se odvijaju operacije često nadilazi sposobnosti i najboljih svjetskih kirurga, dok karakteristike robotskih sustava, kao što su velika preciznost, ponovljivost i izdržljivost, čine ih idealnim kirurškim pomagalima i omogućavaju izvođenje kompleksnih operativnih zahvata i na mikroskopskim razinama.

Neurokirurgija se pokazala kao veliki izazov upravo zbog same anatomije i velike osjetljivosti okolnog tkiva, a zadnja dva desetljeća uložili su se veliki naponi akademskih institucija i industrije kako bi se razvili robotski sustavi prikladni za rad u operacijskim salama. Napredak u računalne tehnologije, inženjerstvo i manje invazivne kirurške metode, zajedno sa novim oblicima vizualizacije potkožnog tkiva stvorile su potpuno nove koncepte u neurokirurškoj robotici.

## 2. PRIMJENA ROBOTA U NEUROKIRURGIJI<sup>[2]</sup>

Nedavni napredci u vizualizaciji mozga (CT, MRI, iMRI, fMRI), stereotaksičnoj i računalnoj tehnologiji omogućili su veliki napredak minimalno invazivnih zahvata u ograničenom prostoru (keyhole surgery) do tih razina preciznosti i osjetljivosti da će uskoro biti izvan granica ljudskih sposobnosti i ponajboljih kirurga današnjice, i stoga su roboti sasvim prirodan slijed u tom području. Štoviše, ekonomske prednosti, povećana preciznost i poboljšana kvaliteta u industrijskoj primjeni je potaknula i primjenu robota u neurokirurgiji. Ti neurokirurški roboti imaju značajne izvedbene prednosti u odnosu na neurokirurge; pouzdaniji su u izvođenju kompleksnih i složenih procedura više puta za redom, bez umora, velikih varijacija u izvođenju, te bez pada koncentracije uzrokovanog umorom ili višestrukim ponavljanjem iste radnje. Posjeduju gotovo savršenu preciznost, otporni su na rad u opasnim okolinama (imaju „savršen“ imunitet na sve biološke agense i veliku većinu kemijskih), i mogu raditi kroz vrlo uske i dugačke kirurške prolaze, što ih čini idealnim alatima za zahvate na mozgu. Roboti također mogu vidjeti dijelove područja zahvata pod kutovima koji su izvan vidnog područja kirurga za vrijeme operacije i na neki način, roboti značajno proširuju vizualne i manipulacijske sposobnosti neurokirurga iznad njihovih prirodnih granica.

Neke ergometrijske studije su pokazale značajan umor kirurga, koji je značajno ovisio o samom trajanju zahvata, te položaju i kutu korištenja kirurških instrumenata. Zbog toga je kroz zadnja tri desetljeća razvijeno nekoliko sustava za primjenu u neurokirurgiji. Neki od tih sustava se uspješno primjenjuju u operacijskim dvoranama, dok se drugi zbog sigurnosti i etičkih pitanja nisu nikada ni približili pacijentima te na taj način doživjeli svoju kliničku primjenu.

### 2.1. Povijest robota u neurokirurgiji

Neurokirurški roboti su imali dug razvojni put koji se protezao kroz dva desetljeća. Glavni razlog toliko dugog razvoja bili su vrlo strogi propisi u zdravstvu. S druge strane, industrijski su se roboti vrlo brzo infiltrirali u proizvodne sustave i procese, i to upravo iz razloga što su mogli djelovati odvojeni od ljudi, čime nisu predstavljali nikakve sigurnosne rizike, dok su neurokirurški roboti bili dizajnirani tako da djeluju u interakciji sa ljudima, izvoдеći samostalno ili pomažući kirurzima izvoditi vrlo kompleksne i zahtjevne kirurške zahvate na pacijentima.

U nastavku su nabrojani neki od primjera robota koji se primjenjuju u neurokirurgiji po kronološkom redu:

#### ➤ PUMA 200 (Advances Research & Robotics, Oxford, CT, 1985):

Standardni industrijski robot PUMA 200 koji je iskorišten kako bi držao stereotaksičnu iglu za biopsiju u pacijentu koji je bio na CT skeneru. Ciljano područje za biopsiju je bilo identificirano pomoću prikaza sa CT skenera, a robot je korišten kako bi orijentirao i pozicionirao cjevčicu kroz koju se navodila igla. PUMA je programibilan, numerički upravljani, fleksibilan robot sa 6 stupnjeva slobode gibanja, koji je dizajniran za izvođenje vrlo preciznih i delikatnih poslova, sa dovoljnom krutošću da bi zadržavao stabilnu putanju kretanja. Dizajniran je za siguran rad sa ljudima i opremljen je sa opružnim, elektromagnetskim kočnicama, koje se blokiraju u slučaju da dođe do bilo kakvog kvara, bilo mehaničke ili električke prirode. Posjeduje preciznost od 2 i ponovljivost od 0,05 mm.

➤ **Minerva (University of Lausanne, Switzerland):**

Minerva je sustav sa 5 stupnjeva slobode gibanja, 3 translacije i 2 rotacije, a sam robot se kreće još i po linearnoj traci. 1993 godine sustav je korišten u dvije operacije na pacijentima, ali nakon toga projekt je zaustavljen. Problem su predstavljali ograničeni stupnjevi slobode gibanja, robot je bio nezgrapan i nalazio se unutar CT skenera, zbog čega je samo okruženje bilo neidealno za izvođenje neurokirurških procedura i dijagnozu. Nije se mogao osloboditi od stereotaksičnog okvira, što mu je značajno smanjivalo performanse. Također je bio i fiksiran za CT skener, što je sami zahvat činilo dužim u izvedbi, a i skener se za to vrijeme nije mogao koristiti za drugu dijagnostiku.

➤ **Evolution 1 (Universal Robotics Systems, Schwerin, Germany):**

Ovaj robot, sa 6 stupnjeva slobode gibanja bio je dizajniran i predviđen za operacijske zahvate i na mozgu i na kralježnici. Njegova heksapodna struktura, sa linearnim aktuatorima omogućavala mu je visoki stupanj preciznosti i veliku nosivost za procedure bušenja ili pozicioniranje neuroendoskopa.

➤ **NeuroMate Robot (Integrated Surgical Systems, Davis, California, USA):**

Komercijalno dostupan robot, odobren od FDA, sa 6 stupnjeva slobode gibanja, i objedinjuje CT, MRI i angiografiju. Korišten je u kombinaciji sa stereotaksičnim okvirom za pozicioniranje cjevčica ili sonde za biopsiju, i za prilaženje mjestima duboko u mozgu. Originalan sustav je s vremenom redizajniran i prilagođavan kako bi ispunio specifične stereotaksične zahtjeve i posebna pozornost je posvećena sigurnosti. Da bi se zahvat mogao izvesti, robot mora znati gdje mu je pozicija u odnosu na pacijenta, a NeuroMate se pozicionira pomoću kalibracijskog kaveza, koji je smješten na pacijentovu glavu.

➤ **CyberKnife (Accuracy Inc, Sunnyvale, CA):**

Robotski sustav CyberKnife je dizajniran tako da izvodi stereotaksične procedure bez stereotaksičnog okvira, a preciznost mu je mjerljiva sa suvremenim sustavima koji su bazirani na lokalizaciji pomoću okvira. Jedinstvena sposobnost ciljanja ovom sustavu omogućava otkrivanje tumora i ozljeda u realnom vremenu, automatski se prilagođava pacijentovim vitalnim funkcijama i može dostaviti veliku količinu zračenja na vrlo mala područja sa iznimnom preciznošću. To omogućava pristup mjestima do kojih se prije nije moglo doći ili je to bilo iznimno teško uz brži, sigurniji i manje invazivniji tretman.

### 3. OPREMA ROBOTSKOG NEUROKIRUŠKOG SUSTAVA

U ovome poglavlju biti će ukratko opisana oprema koja je odabrana i koja će se koristiti za izradu dvoagentnog neurokirurškog sustava. U tu opremu spadaju roboti sa upravljačkim jedinicama, te oprema i alati nužno neophodni za uspješno obavljanje operacijskih zadaća. Roboti koji će se koristiti su Fanuc LR Mate 200iC5L (kasnije će biti implementiran KUKA KR 6 R900 sixx) i KUKA LBR4, dok će od alata i opreme biti korišteni markerska pločica, kamera sa laserskim senzorom, stereovizijski sustav, kirurška bušilica, kateter, kalibracijska kugla i kalibracijska igla.

Roboti su neizostavni dio bilo kojeg automatskog sustava jer oni su "ruke" koje obavljaju operacije. Da bi robot mogao izvršavati radne zadatke, bitne stavke na koje treba obratiti pozornost jesu:

- Kontroler – upravlja radom robota
- Broj stupnjeva slobode gibanja – broj zglobova koji se mogu gibati neovisno jedan o drugome
- Nosivost [kg] – maksimalni teret kojim robot može upravljati
- Preciznost – odstupanje od programski zadane putanje, pozicije i orijentacije u koju robot mora doći.
- Ponovljivost [mm] – tolerancija koja govori o tome s kojom točnošću robot može ponavljati radnje, tj. Koje mu je odstupanje ako ga se više puta pošalje u istu točku.
- Masa robota [kg] – bitna je zbog toga što daje informacije na temelju kojih se može projektirati sustav i pozicija samog robota unutar tog sustava.
- Doseg [mm] – doseg koji robot može dohvatiti sa alatom u odnosu na ishodište koordinatnog sustava. Ishodište koordinatnog sustava robota u pravilu se nalazi u središtu baze robota.
- Granice kretanja [ $^{\circ}$ ] ili [mm] – granice unutar kojih robot može pokretati pojedinu os.
- Maksimalna brzina [ $^{\circ}$ /s] ili [mm/s] – maksimalna brzina koju može postići pojedina os. Iznosi su u relativnim brzinama.
- Moment [Nm] – moment koji može postići pojedina os robota.
- Inercija [ $\text{kg m}^2$ ] – momenti inercije koji se mogu pojaviti na pojedinoj osi.
- Komunikacija – Na koji način se odvija komunikacija sa upravljačkom jedinicom i senzorima kojima se robot koristi, te na koji način korisnik može komunicirati (slati mu naredbe i primati povratne informacije o izvršenju zadaća) sa robotom

### 3.1. Fanuc LR Mate 200iC5L<sup>[3]</sup>

LR MATE 200iC5L (Slika 3.1) je iz serije najmanjih modela robota u Fanuc-ovoj ponudi, nosivosti od 2 ÷ 5 kg. To su roboti idealni za izvršavanje brzih i preciznih zadataka u svim vrstama okoliša. Njihovim radom upravlja R-30iA Mate kontroler koji zahtjeva minimalni prostor. Namijenjeni su za operacije kao što su:

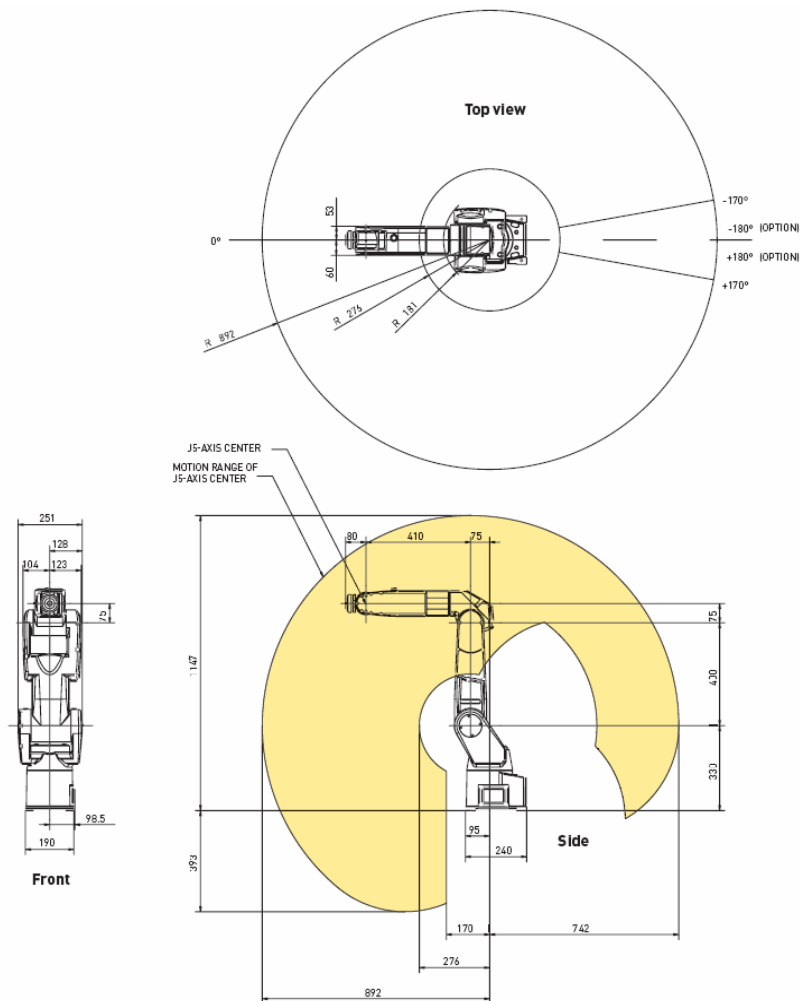
- Posluživanje strojeva
- Rukovanje materijalima
- Čišćenje dijelova
- Montaža
- Testiranje i mjerenje
- Rezanje, brušenje, skidanje srha i poliranje
- Pakiranje

Robot može biti montiran na podu ili stropu bez ikakvih ograničenja, dok kod postavljanja pod kutom od 90°, robot može raditi ograničeno (momenti u bazi robota se značajno povećavaju pa mora raditi sa manjim teretima i brzinama). Izmjerena brzina TCP-a (Tool Center Point) iznosi 4 m/s, a vrijeme ciklusa mu je 120 ciklusa/min, što ga čini najbržim robotom u klasi. Može biti instaliran unutar alatnih strojeva (u radnom prostoru stroja, što se čini kako bi robot mogao posluživati stroj), te laka, brza i jeftina instalacija. Na malom prostoru može raditi više robota istovremeno. Sposobnost rada u prašnjavim i vlažnim sredinama (serija LR MATE 200iC/5WP može raditi uronjena u vodu). Smanjeni su troškovi održavanja, produžen životni vijek i povećana učinkovitost. Kompaktna konstrukcija omogućava laku integraciju u razne sustave i smanjenje investicijskih troškova, te zauzima manje prostora. Pojednostavljeni mehanizmi smanjuju rizike zastoja, a zadržana je visoka preciznost i ponovljivost.



Slika 3.1 LR Mate 200iC5L

Kontroler		R-30iA Mate
Broj stupnjeva slobode gibanja		6
Maksimalna nosivost [kg]		5
Ponovljivost [mm]		$\pm 0,03$
Masa robota [kg]		29
Doseg [mm]		892
Granice kretanja [°]	Prva os (J1)	340/360
	Druga os (J2)	230
	Treća os (J3)	373
	Četvrta os (J4)	380
	Peta os (J5)	240
	Šesta os (J6)	720
Maksimalna brzina [°/s]	Prva os (J1)	270
	Druga os (J2)	270
	Treća os (J3)	270
	Četvrta os (J4)	450
	Peta os (J5)	450
	Šesta os (J6)	720
Moment [Nm]/ Inercija [kg m <sup>2</sup> ] – četvrta os (J4)		11,9/0,3
Moment [Nm]/ Inercija [kg m <sup>2</sup> ] – peta os (J5)		11,9/0,3
Moment [Nm]/ Inercija [kg m <sup>2</sup> ] – šesta os (J6)		6,7/0,1

**Tablica 3.1** Tehničke karakteristike robota LR MATE 200iC/5L**Slika 3.2** Dimenzije i radni prostor robota LR MATE 200iC/5L



### 3.1.1. R-30iA Mate upravljačka jedinica

R-30iA Mate (Slika 3.3) je Fanuc-ova upravljačka jedinica za LR MATE 200iC robote koja omogućava napredne inteligentne aplikacije na relativno jednostavnom sustavu.

Napredna komunikacija omogućava jednostavnu i brzu komunikaciju sa serverom robota, ugrađena Ethernet kartica, Fanuc-ovi ulazno – izlazni (I/O) linkovi, E-mail funkcija, Fieldbus (profibus, devicenet, CClink).

Ulaz – izlaz (I/O) su električni signali pomoću kojih se kontrolira rad hvataljki i ostalih alata na robotu. Pomoću tih signala je moguća i komunikacija sa drugim robotima ili strojevima (npr. CNC strojevi) koje robot može posluživati. Postavke I/O signala mogu se odvojeno kopirati pohranjivati na PCMCIA memorijske kartice ili na USB memorijske ključice. R-30iA nudi nekoliko različitih tipova ulazno – izlaznih signala:

- DI/DO – digitalni signal
- RI/RO – digitalni signali robotske ruke
- GI/GO – grupirani I/O signali
- UI/UO – digitalni I/O signali za daljinsku kontrolu pomoću eksternog PLC-a
- AI/AO – analogni signali

Za pokretanje upravljačkoj jedinici je potrebno manje od 1 min. U slučaju nestanka struje pokretanje sustava traje jako kratko. HOT START funkcija omogućava sigurno pokretanje sustava i nastavak rada gdje je stao. Nema potrebe za ponovnim izvođenjem cijele operacije. Sustav provjere pozicije; ukoliko dođe do prekida rada iz bilo kojeg razloga, robot memorira zadnju poziciju. Kada se program ponovo pokrene, robot provjerava trenutnu poziciju te da li je bio pomican izvan granica tolerancija. Na taj način se sprječavaju nepredviđene kretnje i kolizije.

Upravljačka jedinica sadržava minimalni broj komponenata, što znatno olakšava održavanje (masa mu iznosi oko 55 kg). Radi sa Fanuc-ovim operativnim sustavom, što ima i prednosti:

- Nema virusa (nije baziran na MS Windows OS)
- Visoka zaštita podataka u slučaju nestanka struje ili nekog drugog kvara
- Brzo podizanje osnovnih programa i funkcija
- Lagan za korištenje

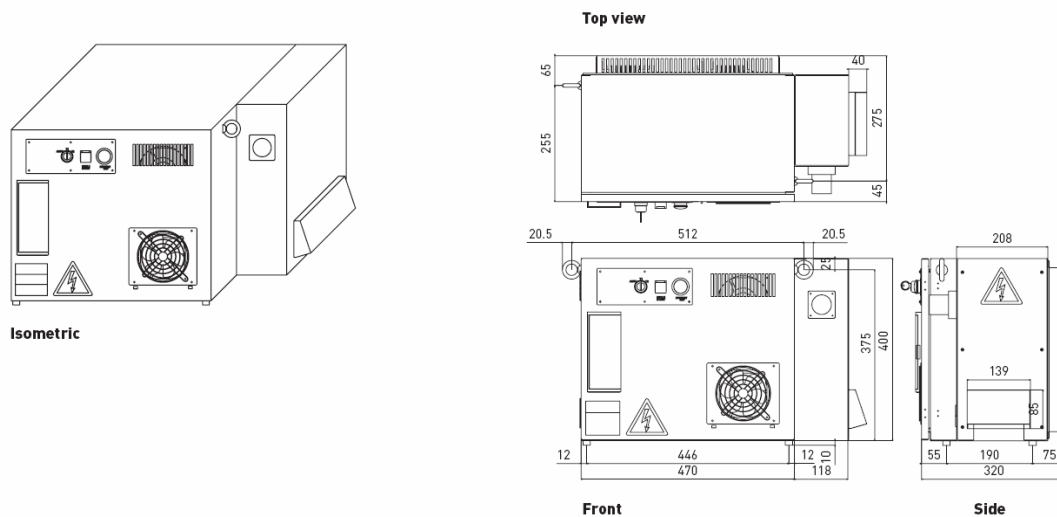
Sustav kontrole motora protiv preopterećenja kontinuirano prati iznose struja na servo motorima, a sustav protiv pregrijavanja prati rasipanje energije i kapacitet svakoga motora. U slučaju pregrijavanja, javlja se alarm i roboti se trenutno zaustavljaju. također postoji i sustav protiv kolizije (u slučaju kolizije motori su dodatno opterećeni) koji sprječava nastanke većih šteta.



Slika 3.3 Upravljačka jedinica R-30iA Mate



Slika 3.4 Upravljačko sučelje

Slika 3.5 Dimenzije upravljačke jedinice R-30iA Mate ( $m \approx 55 \text{ kg}$ )

### 3.2. KUKA KR 6 R900 sixx<sup>[4]</sup>

KR 6 R900 sixx (Slika 3.6) je Kuka model iz sveobuhvatne familije malih robota KR AGILUS, namijenjeni za:

- Rukovanje materijalima
- Montažu i demontažu sklopova
- Opsluživanje alatnih strojeva
- Nanošenje zaštitnih premaza, brtvila i ljepila
- Vijčanje
- Mjerenje, testiranje i završnu kontrolu
- Paletizaciju i pakiranje

Također posjeduju neke bitne značajke kao što su velika brzina (prilikom izvođenja zadataka, pogotovo kod montažnih zadaća, do izražaja dolazi jedna od njihovih najjačih značajki, a to je

velika brzina, koja značajno skraćuje vrijeme izvođenja ciklusa), preciznost (zahvaljujući velikoj krutosti zglobova roboti iz ove familije proizvoda rade sa konstantnom preciznosti unutar cijelog radnog prostora, kad god postoje zahtjevi za velikom ponovljivosti i točnosti), integrirani energetske sustavi (radi olakšanog i nesmetanog kretanja u radnom prostoru, mali roboti imaju unutar sebe integrirane sustave za opskrbu energijom (električni vodovi, pneumatski sustav), kao i komunikacijske sustave (EtherCAT/EtherNet kartice)), velika fleksibilnost kod pozicioniranja i montiranja (mogućnost pozicioniranja i montiranja robota na pod ( $0^\circ$ ), zid ( $90^\circ$ ) i plafon ( $180^\circ$ )), niski zahtjevi za održavanjem i servisiranjem (nema potrebe za izmjenom podmazujućih medija unutar motora i reduktora što ove robote čini idealnima za konstantan i neprekidan rad), optimalan radni prostor (dosega od 1,1 metar, i mogućnosti dohvata točaka koje se nalaze u blizini baze, KR AGILUS nudi optimalan radni prostor, i veliku manevarbilnost u svim pozicijama).

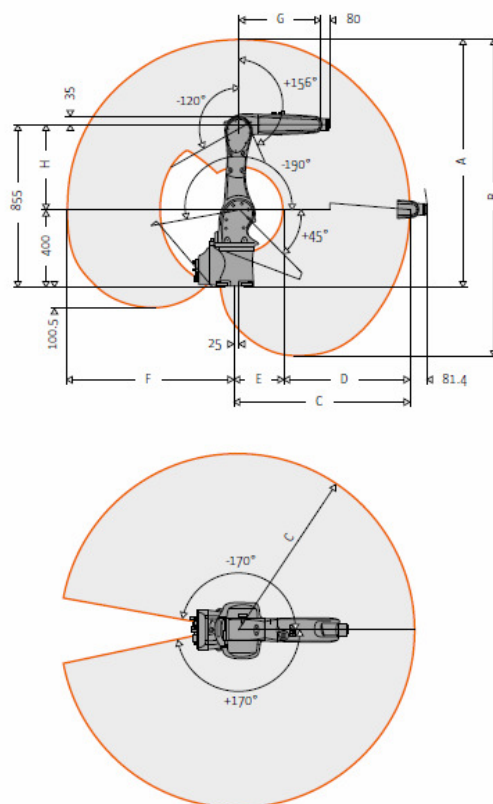


**Slika 3.6** KR 6 R900 sixx

Kontroler	KR C4 compact	
Broj stupnjeva slobode gibanja	6	
Maksimalna nosivost [kg]	6	
Ponovljivost [mm]	-	
Masa robota [kg]	51	
Doseg [mm]	901	
Radna temperatura [ $^\circ\text{C}$ ]	+5 do +45	
Granice kretanja [ $^\circ$ ]	Prva os (A1)	$\pm 170$
	Druga os (A2)	+45/-190
	Treća os (A3)	+156/-120
	Četvrta os (A4)	$\pm 185$
	Peta os (A5)	$\pm 120$
	Šesta os (A6)	$\pm 350$

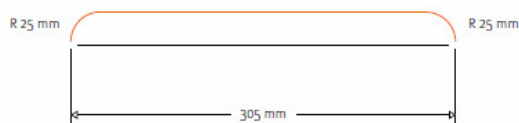
**Tablica 3.2** Tehničke karakteristike robota KR 6 R900 sixx

Work envelope <sup>2)</sup>	Dimensions A	Dimensions B	Dimensions C	Dimensions D	Dimensions E	Dimensions F	Dimensions G	Dimensions H
KR 6 R900 sixx	1,276 mm	1,620 mm	901.5 mm	656 mm	245.5 mm	851.5 mm	420 mm	455 mm



#### Cycle time

KR 6 R900 sixx (25/305/25; 1 kg Payload)	More than 150 cycles/min
--	--------------------------



Slika 3.7 Dimenzije i radni prostor robota KR 6 R900 sixx

### 3.2.1. KR C4compact upravljačka jedinica

KR C4 compact (Slika 3.8) najnovija je i najnaprednija upravljačka jedinica iz KUKINOG asortimana. Omogućava visoke performanse i veliku pouzdanost u kompaktnome dizajnu. Fleksibilna konfiguracija i mogućnost dodatnog proširivanja (programskog ili implementacijom dodatnih osi i pomoćnih elemenata) koju ova upravljačka jedinica nudi, daju joj velike mogućnosti različitih primjena. Broj hardvera, električnih kablova i konektora značajno je smanjen i zamijenjen programskim rješenjima. Robusne i kvalitetne izrade, ova upravljačka jedinica ne zahtjeva veliko održavanje, a rashladni sustav se uključuje samo po potrebi i gotovo je nečujan.

Male i kompaktne dimenzija kućišta omogućavaju postavljanje u manjim i skućenijim prostorima. Usprkos tome, KR C4 compact je zadržao sve značajke i mogućnosti standardnih i većih KR C4 upravljačkih jedinica, a to su potpuna kontrola nad sigurnosnim sustavima, robotom, logikom i upravljanjem procesima. Zahvaljujući otvorenoj arhitekturi, KR C4 compact osim robota može kontrolirati i upravljati dodatnim vanjskim osima (linearna traka, rotacijski stol i sl.). Osim standardnog KUKA programskog jezika (SRC), KR C4 može čitati i izvršavati naredbe pisane u standardnom CNC programskom jeziku (G kod), te u jezicima za programiranje PLC-a.

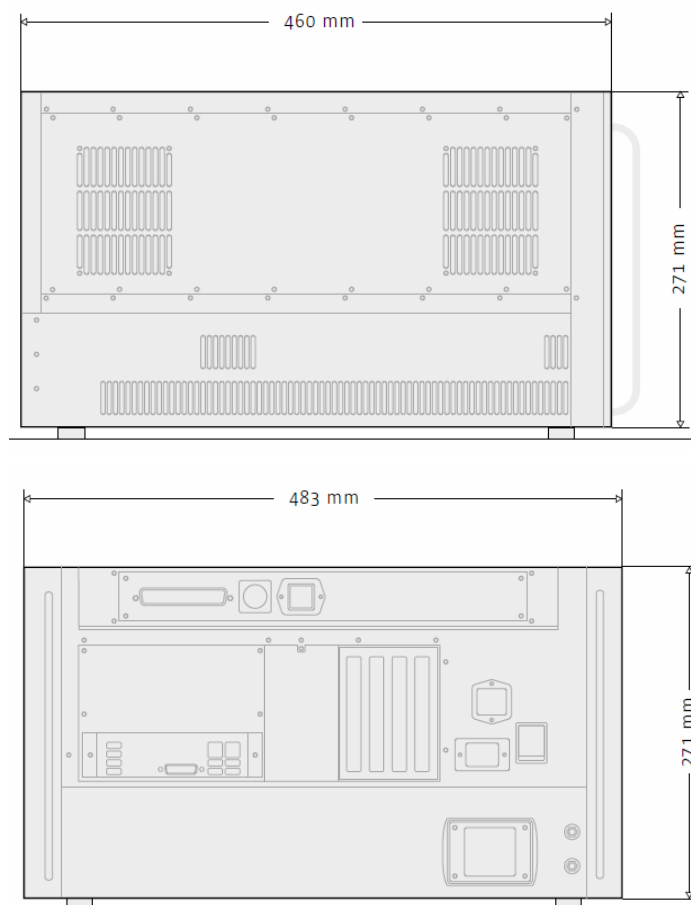
Sa svojim velikim ekranom osjetljivim na dodir, upravljačko sučelje KUKA SmartPAD (Slika 3.9) omogućava upravljanje i kontrolu i nad robotom i nad cjelokupnim sustavom, koji može biti prikazan na ekranu. Sučelje se samostalno prilagođava na način da korisniku prikazuje samo one informacije, i omogućava samo one naredbe koje su u danome trenutku potrebne za potpunu kontrolu nad sustavom. Naglasak je uvijek na onome što je bitno, tako da je rad puno intuitivniji, brži, lakši i učinkovitiji.



**Slika 3.8** Upravljačka jedinica KR C4 compact



**Slika 3.9** Upravljačko sučelje KUKA smartPAD



**Slika 3.10** Dimenzije upravljačke jedinice KR C4 compact

### 3.3. KUKA LBR4<sup>[4]</sup>

LBR4 (Slika 3.11) je 7 osni model iz KUKA palete proizvoda, nosivosti 7 kg i kompaktnim postoljem za pričvršćivanje na krutu podlogu. U usporedbi sa standardnim 6 osnim robotima, 7 os ovom robotu daje daleko veću fleksibilnost, što znači da istu poziciju i orijentaciju alata robot može postići sa više različitih položaja zglobova (7 SSG daje puno veću redundantnost u odnosu na 6 SSG)(Slika 3.12) i može izvoditi operacije na mjestima do kojih drugi roboti ne mogu pristupiti i u pozicijama koje su za druge robote neizvedive. Robot može biti i vođen rukom kroz svoj radni prostor, bez upotrebe upravljačkog sučelja, što još dodatno olakšava učenje i programiranje robota. Ručno vođenje po prostoru je moguće sa svih 7 osi, što programiranje čini lakšim i učinkovitijim. Kada se robot dovede u određenu poziciju i pusti iz ruke, on zadržava tu istu poziciju. Takav način programiranja uvelike štedi na vremenu i puno je intuitivniji, lakši i brži od klasičnog načina učenja robota. Senzori sila i momenata u svim osima čine ovaj model robota vrlo prikladnim za montažu gdje je potrebna određena sila pritiska, kontroliranje procesa, te određivanje pozicije i objekata unutar radnog prostora robota. Dakle, u ovom slučaju je robot taj koji ima određena osjetila a ne alat, što omogućava korištenje jednostavnijih i jeftinijih alata. Integrirani senzorski sustav je u potpunosti funkcionalan, što uklanja potrebu za kompliciranom i mukotrpnom implementacijom (ugradnjom, konfiguriranjem i testiranjem) senzora.

Lagano aluminijsko kućište spregnulo je motore, reduktore, kočnice i senzore, kao i elektroniku za napajanje i upravljanje sa svih 7 osi. Transport i premještanje robota na drugo radno mjesto je jednostavno, lako i brzo i ne zahtjeva nikakvu dodatnu pomoćnu opremu, što ga čini još fleksibilnijim. Zahvaljujući maloj masi od samo 16 kg i malom potrošnjom energije, može biti pogonjen i pomoću akumulatorskih baterija.



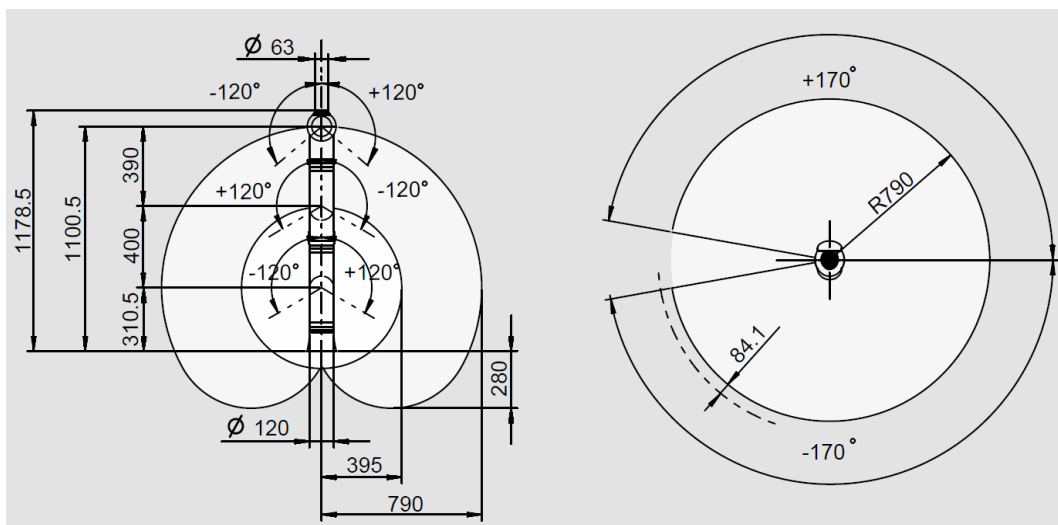
**Slika 3.11 KUKA LBR4**



**Slika 3.12 Redundantnost robota LBR4**

Kontroler	KR C2 lr	
Broj stupnjeva slobode gibanja	7	
Maksimalna nosivost [kg]	7	
Ponovljivost [mm]	±0,05	
Masa robota [kg]	16	
Doseg [mm]	1178,5	
Radna temperatura [°C]	+5 do +45	
Granice kretanja [°]	Prva os (A1)	±170
	Druga os (A2)	+210/-30
	Treća os (A3)	±120
	Četvrta os (A4)	±170
	Peta os (A5)	±130
	Šesta os (A6)	±170
	Sedma os (E1)	±170
Maksimalna brzina [°/s]	Prva os (A1)	110
	Druga os (A2)	110
	Treća os (A3)	128
	Četvrta os (A4)	204
	Peta os (A5)	184
	Šesta os (A6)	184
	Sedma os (E1)	128
Moment [Nm]	Prva os (A1)	176
	Druga os (A2)	176
	Treća os (A3)	100
	Četvrta os (A4)	100
	Peta os (A5)	38
	Šesta os (A6)	38
	Sedma os (E1)	100

Tablica 3.3 Tehničke karakteristike robota LBR4



Slika 3.13 Dimenzije i radni prostor robota LBR4

### 3.3.1. KR C2 lr upravljačka jedinica

KR C2 lr (Slika 3.14) je 19“ upravljačka jedinica iz serije KR C2 upravljačkih jedinica. Potpuno integrirani kontrolno-upravljački koncept za cijeli spektar robota nosivosti od 3 pa do 570 kg. Osnovna varijanta omogućava upravljanje 6 osnim robotom sa još dvije dodatne osi (6+2), ali je moguća nadogradnja za upravljanje sa još 4 dodatne osi (6+6). Upotreba već isprobanog i testiranog upravljačkog sistema u kombinaciji sa standardnim PC računalom osigurava veliku pouzdanost na visokoj tehnološkoj razini. Modularna struktura i upravljanje



svakom osi zasebno pruža vrlo jednostavno održavanje upravljačke jedinice i laganu zamjenu dijelova bez upotrebe alata. Elektronički sigurnosni koncept, baziran na sabirničkoj tehnologiji. Odvojeno napajanje za memoriju sa dodatnim baterijama (ukoliko dođe do nestanka struje, postavke sa trenutnim pozicijama se pohranjuju tako da se proces kasnije može nastaviti tamo gdje je stao). Vanjske osi se mogu isključiti svaka zasebno koristeći fail-safe tehnologiju (u slučaju naglog zastoja neće doći do nikakvih oštećenja sustava ili će oštećenja biti minimalna). Sveobuhvatna dijagnoza pogonskih sustava pomoću sabirničke tehnologije može trenutno identificirati izvor i uzrok zastoja.

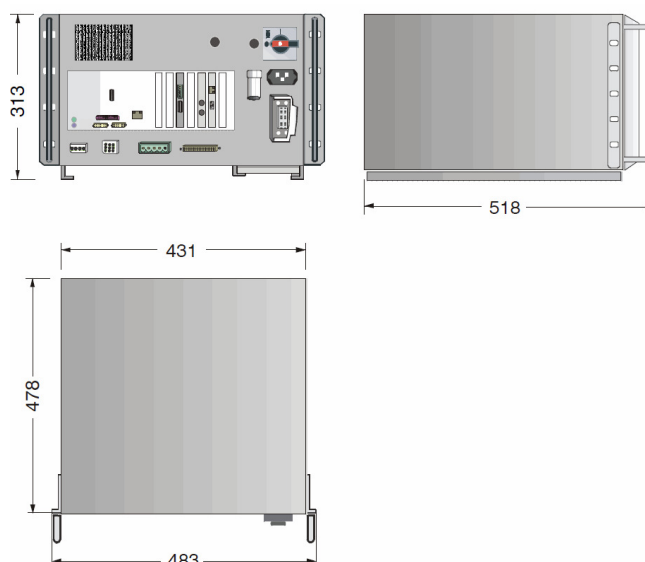
Ergonomski dizajnirano upravljačko sučelje KCP (KUKA Control Panel) (Slika 3.15) posjeduje sve potrebne funkcije, za upravljanje, kontrolu i programiranje robotskog sustava. Posjeduje 8" ekran u boji (rezolucije 640×480), na kojemu su prikazana sva stanja robota i aktivne naredbe u izvođenju.



**Slika 3.14** Upravljačka jedinica KR C2 lr



**Slika 3.15** Upravljačko sučelje KPC



**Slika 3.16** Dimenzije upravljačke jedinice KR C2 Jr

### 3.4. Alati i senzori

Alati, senzori služe za interakciju robota sa okolišem. Pomoću senzorskih sustava robot percipira svoju okolinu, te na temelju dobivenih informacija donosi odluke o poduzimanju potrebnih radnji i/ili o korekciji putanje gibanja kako bi se izvršila određena zadaća.

Vrste senzora:

- Vizijski sustavi – u vizijske sustave spadaju kamere koje snimaju okolinu i aplikacije koje na temelju dobivenih informacija raspoznaju objekte u okolini i unutar samog sustava.
- Laserski senzori – oni najčešće služe za određivanje udaljenosti predmeta od sustava (senzora).
- Senzori sila i momenata – oni registriraju i reguliraju sile i momente na prihvatnici.
- Ultrazvučni senzori – Mogu prepoznavati objekte u prostoru i njihovu udaljenost, ali razlučivost im je daleko niža od vizijskih sustava ili laserskih senzora.

Nakon primanja informacije sa senzorskog sustava, pomoću alata robot je u stanju obaviti određene zadatke. Spektar alata koji se primjenjuju u robotici je velik, i u pravilu svi alati kojima se služi čovjek može se služiti i robot; hvataljke – služe kao ruke robotu, pištolji za zavarivanje (najčešće elektrootporno, ali mogu se i primijeniti i druge metode zavarivanja), alati za nanošenje adheziva, lakiranje, poliranje, alati za obradu odvajanjem čestica i dr.

U operacijskoj sali robot se može koristiti svim instrumentima i opremom koju koristi i neurokirurg, uz dodatak visoko preciznih senzorskih sustava. Senzorska i kirurška oprema koja će se koristiti sa ovim sustavom jest slijedeća:

- Markerska pločica
- Kamera sa laserskim senzorom
- Stereovizijski sustav

- Kirurško svrdlo
- Kateter
- Kompenzacijska kugla (za ispravljanje greške i točno pozicioniranje markerske pločice)
- Kompenzacijska igla

### **3.4.1. Markerska pločica**

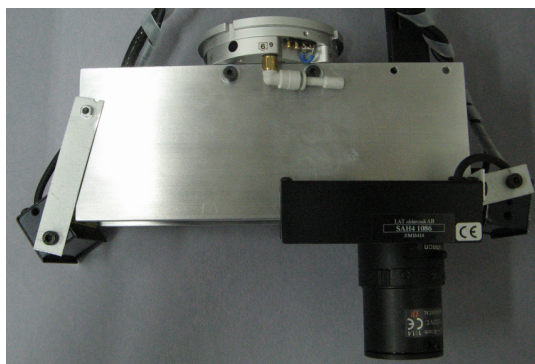
Služi za lociranje i poravnavanje robota sa pacijentom (Slika 3.17). Prilikom snimanja glave (CT, MRI i dr.) markerska pločica nalazi se na glavi pacijenta te se na taj način, preko vizualizacije mozga, ciljano područje operativnog zahvata može točno pozicionirati u odnosu na markersku pločicu, a kasnije i u robotskom prostoru.



**Slika 3.17** Markerska pločica

### **3.4.2. Kamera sa laserskim senzorom**

Ovaj alat je kombinacija kamere sa laserskim senzorom (Slika 3.18), a njegova je svrha prepoznavanje, pozicioniranje i orijentiranje objekata u prostoru u odnosu na koordinatni sustav robota. Koristi se Baslerova industrijska kamera u boji scA640-120fc (Slika 3.19), sa brzinom okidanja od 120 slika u minuti, rezolucije 658×492 pixela<sup>[5]</sup>. Na kameri se koristi Tamronov objektiv 12VM1040ASIR (Slika 3.20) duljine žarišta 10-40 mm, fokusa 0,5 m -  $\infty$ <sup>[6]</sup>. Laserski senzor je Acuity AR700 (Slika 3.21), koji triangulacijskom metodom mjeri udaljenost objekta na način da pomoću laserske zrake stvara točku na promatranoj površini koja se pod određenim kutom promatra sa CMOS senzorom. Preciznost laserskog senzora iznosi  $\pm 0,25$  mm<sup>[7]</sup>.



**Slika 3.18** Alat kamera sa laserskim senzorom



Slika 3.19 Kamera Basler sCA640-120fc

Senzor slike	Sony, ICX618, Progressive Scan CCD, global shutter, 1/2"
Rezolucija	658×492 pixela
Brzina okidanja	120 [FPS] (slika u sekundi)
Prikaz slike	U boji
Priključci	FireWire-b, 1394 bus
Napon	8-36 VDC
Snaga	3. W
Povećanje	Automatsko/ručno
Modovi okidača	Vanjsko okidanje, 1394 bus, slobodno okidanje
Kontrola ekspozicije	1394 bus
Digitalni ulaz/izlaz	2/4
Dimenzije [D×Š×V]	73.7 × 44 × 29 [mm]
Masa	160 [g]
Radna temperatura	0 ÷ 50 [°C]
Namještanje leće	C/CS nosač leće

Tablica 3.4 Tehničke karakteristike Basler-ove kamere sCA640-120fc



Slika 3.20 Objektiv Tamron 12VM1040ASIR

Žarišna duljina	10 – 40 mm
Fokus	0,5 m - ∞
Masa	77 [g]
Radna temperatura	-20°C ÷ +60°C [°C]
Namještanje leće	C nosač leće

Tablica 3.5 Tehničke karakteristike Tamron-ovog objektiva 12VM1040ASIR



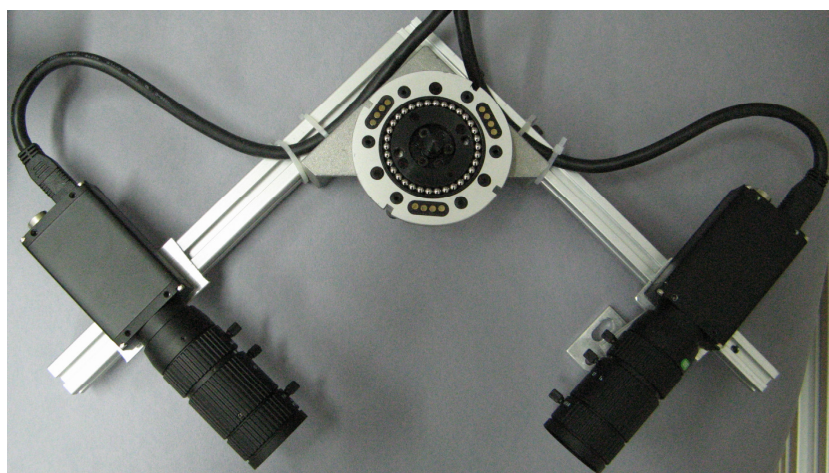
Slika 3.21 Laserski senzor Acuity AR700

Raspon mjerenja	3.175 to 1270 mm).
Preciznost	$\pm 0,03\%$
Uzorkovanje (učestalost izmjera)	9400 uzoraka u minuti
Analogni izlazi	4 - 20 mA
Napajanje	15 – 24 V
Senzor	CMOS
Radna temperatura	0 ÷ 40 [°C]

Tablica 3.6 Tehničke karakteristike Acuity laserskog senzora AR700

### 3.4.3. Stereovizijski sustav

Stereovizijski sustavi (ili 3D vizija) su sustavi koji mogu pomoću kamera (najčešće dvije) točno pozicionirati objekt u okolišu (točnu udaljenost i poziciju u odnosu na referentni koordinatni sustav) (Slika 3.22). Na ovome će se alatu koristiti sustav od dvije Baslerove kamere scA1390-17fc (Slika 3.23). To su kamere u boji, rezolucije 1390×1038 pixelsa, brzine okidanja od 17 slika u minuti i CCD čipom. Ove kamere mogu se primjenjivati za ispitivanje poluvodičkih elemenata i elektroničkih komponenti, kontrolu kvalitete u proizvodnim pogonima, za inspekciju u prehrambenoj industriji, za regulaciju i upravljanje prometom, za mikroskopske i medicinske snimke, biometriju i drugo<sup>[5]</sup>. Na kamerama se nalaze Edmund Optics Macro Zoom objektivni (Slika 3.24), povećanja slike do 3,3×, što ih čini idealnima za testiranje i ispitivanje. Područje snimanja od 6,4 mm do 21,3 mm može biti postignuto sa udaljenosti od 90 mm sa visokom oštrinom slike. Analogno izoštravanje i podešavanje fokusa omogućavaju ovim kamerama i rad u uvjetima sa velikim vibracijama što ih čini idealnima za postavljanje na prihvatnicu robota<sup>[8]</sup>.



Slika 3.22 Stereovizijski sustav



**Slika 3.23** Kamera Basler sCA1390-17fc

Senzor slike	Sony, ICX618, Progressive Scan CCD, global shutter, 1/2"
Rezolucija	1390×1038 pixela
Brzina okidanja	17 [FPS] (slika u sekundi)
Prikaz slike	U boji
Priključci	FireWire-b, 1394 bus
Napon	8-36 VDC
Snaga	2,75 W
Povećanje	Automatsko/ručno
Modovi okidača	Vanjsko okidanje, 1394 bus, slobodno okidanje
Kontrola ekspozicije	1394 bus
Digitalni ulaz/izlaz	2/4
Dimenzije [D×Š×V]	73.7 × 44 × 29 [mm]
Masa	160 [g]
Radna temperatura	0 ÷ 50 [°C]
Namještanje leće	C/CS nosač leće

**Tablica 3.7** Tehničke karakteristike Basler-ove kamere sCA1390-17fc



**Slika 3.24** Objektiv Edmund Optics Macro Zoom

Povećanje slike	3,3×
Područje snimanja	6,4 do 21,3 mm
Žarišna duljina	do 90 mm
Izoštavanje slike	Analogno
Podešavanje fokusa	Analogno

**Tablica 3.8** Tehničke karakteristike Edmund Optics objektiva Macro Zoom



#### 3.4.4. Kirurška bušilica

Svrđlo od nehrđajućeg čelika, promjera Ø3 mm, za rad na visokim brojevima okretaja (Slika 3.25). Visoko je polirane površine, i velike žilavosti kako bi se spriječilo pucanje.



Slika 3.25 Kirurška bušilica

#### 3.4.5. Kateter

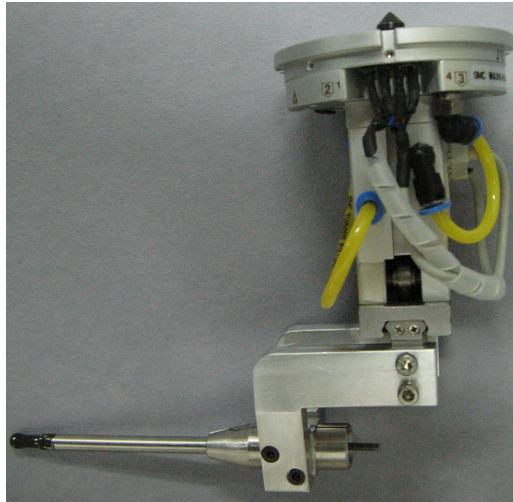
Medtronicovi ventrikularni kateteri (Slika 3.26) dostupni su u malim i standardnim dimenzijama, sa ili bez prirubnica. Duljine su 23 cm, i otporni su na izvijanje, savijanje i na pritisak. Impregniran je barijem kako bi bio vidljiv na rendgenskim snimkama. Po kateteru su otisnuti markeri za duljinu na 5, 10 i 15 cm (+/- 0,25 mm) kako bi kirurzi mogli lakše odrediti dubinu prodora. Vrh katetera je silikonski elastomer impregniran tantalom kako bi bio vidljiv na rendgenu i ima 32 ulazne rupe u četiri linije po osam rupa u svakoj, koje su međusobno zakrenute oko osi katetera za 90°.



Slika 3.26 Kateter

### 3.4.6. *Kalibracijska kugla*

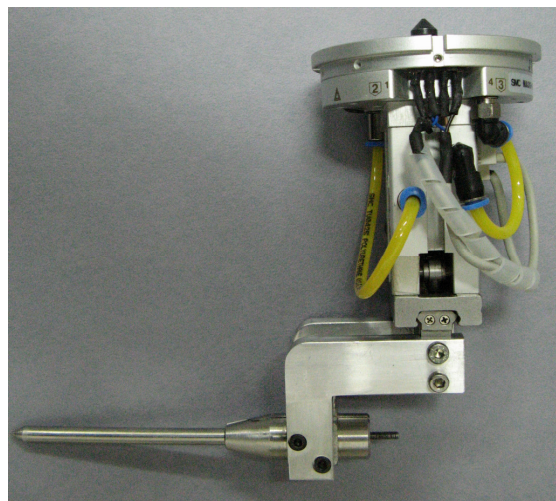
Kalibracijska kugla (Slika 3.27) služi za precizno pozicioniranje robota u odnosu na markersku pločicu na pacijentu. Fanuc sa kalibracijskom kuglom mora dodirnuti vrh šiljka na markerskoj pločici, uz pomoć stereovizijskog sustava na KUKA robotu..



Slika 3.27 Kalibracijska kugla

### 3.4.7. *Kalibracijska igla*

Služi za kalibraciju i umjeravanje alata, te točno definiranje TCP-a pojedinog alata. Sa šiljatim krajem može najpreciznije odrediti neku točku u prostoru ili površini nekoga objekta. Ne koristi se u samome operativnom zahvatu (Slika 3.28).



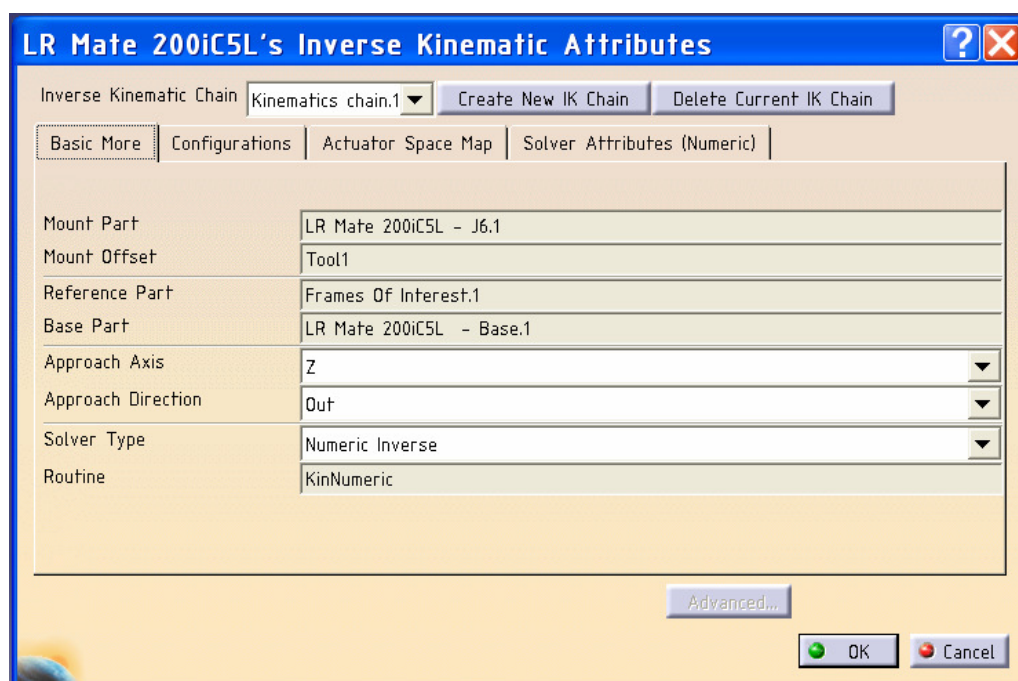
Slika 3.28 Kalibracijska igla



## 4. IZRADA MODELA ROBOTA, ALATA I OPREME

U ovome će poglavlju biti opisan postupak izrade CAD modela robota i alata, definiranje kinematike robota, referentnih točaka robota i alata (globalnih koordinatnih sustava i TCP-a) i usporedba modela sa stvarnim robotima i alatima. Za to će nam poslužiti programski paket DELMIA V5R16, koja u svojim sučeljima nudi sve alate potrebne za projektiranje i verificiranje jednog takvog sustava. Sučelja koja će se najviše koristiti su *Part Design*, *Wireframe And Surface Design*, *Assembly Design*, *Device Building* i *Device Task Definition*.

U *Part Design* sučelju će se modelirati dijelovi robota i alata, a kasnije i cijelo postolje. *Wireframe And Surface Design* sučelje će nam pomoći da kreiramo prostorne krivulje i trajektorije po kojima će se roboti kretati kako bi ispitali ponašanje robota i da li ta pozicija odgovara njihovoj kinematici. *Assembly Design* sučelju će se dijelovi robota i alata spajati u sklopove koji će tvoriti smislene cjeline. *Device Building* i *Device Task Definition* su posebno zanimljiva sučelja. U *Device Building* sučelju se rješava kinematika robota. Tu se dodjeljuju zglobovi i definiraju stupnjevi slobode gibanja (u nastavku SSG), ishodište koordinatnog sustava (to je u pravilu koordinatni sustav baze, ali može se definirati i neki drugi) i TCP robota, na temelju kojih se inverznom kinematskom metodom rješava kinematika robota (Slika ). U tom sučelju se definiraju i limiti kretanja pojedine osi, brzine i ubrzanja zglobova i TCP-a, kinematski odnosi između pojedinih zglobova (ako ih ima), konektori, radni prostor robota i dr.

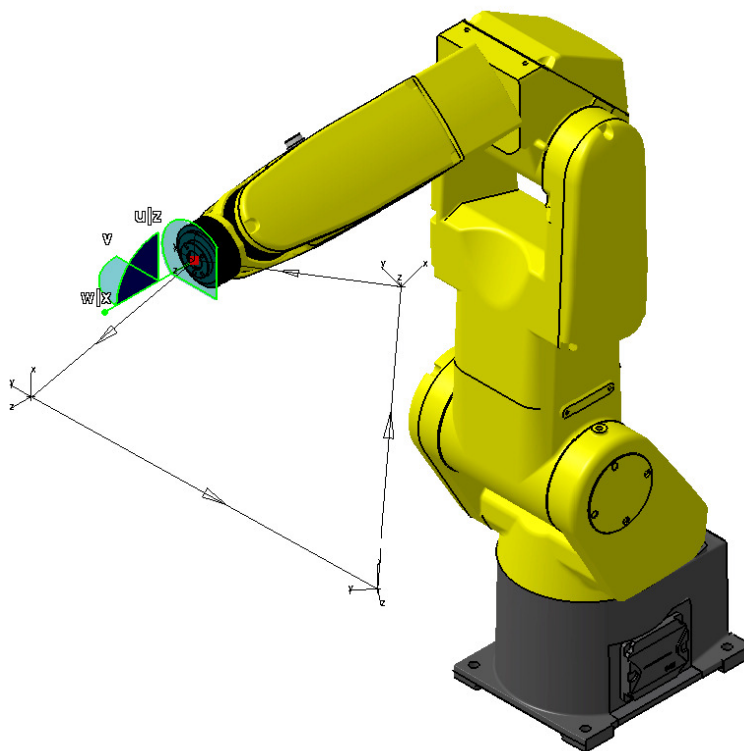


Slika 4.1 Rješavanje kinematike robota pomoću inverzne kinematske metode

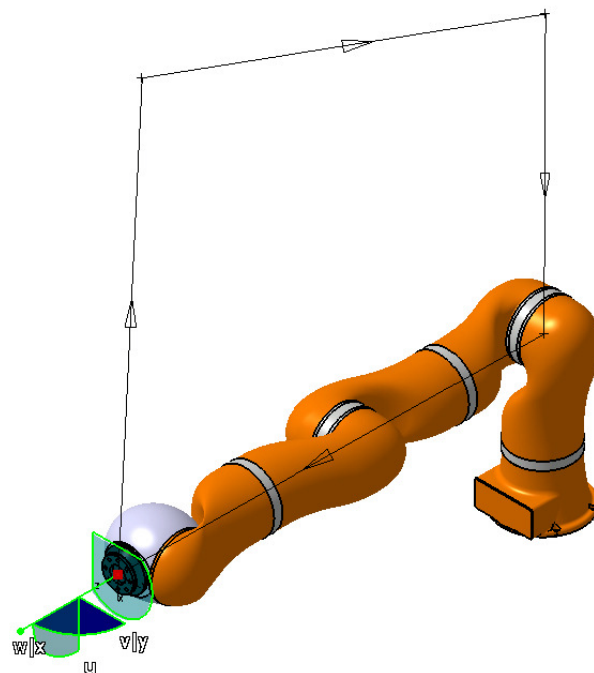
*Device Task Definition* je još jedno, u sklopu DELMIA-e, sučelje posvećeno robotima i automatizaciji procesa. U njemu se uči robotske sustave zadaćama koje moraju obavljati - Diplomski rad izmjenjivanje alata, primanje i ispuštanje objekata pomoću hvataljke (kod montaže), slijeđenje prostorne krivulje po unaprijed zadanim pravilima (zavarivanje, lakiranje) i dr. Učenje se može odvijati na nekoliko načina:

- **Pomoću prostornih markera (tag):** Kada robot dođe u određenu poziciju u prostoru, u toj točki se doznači marker koji ima oblik koordinatnog sustava i čija se pozicija i orijentacija poklapa sa pozicijom i orijentacijom TCP-a (ti markeri su u stvari preslike TCP-a u prostornim točkama u koje želimo dovesti robota) (Slika 4.2).
- **Pomoću zglobova (joints):** Kada robot dođe u određenu poziciju sprema se informacija o zakretima svih zglobova i na taj način pohranjujemo informacije o kretanju robota kroz prostor (Slika 4.3).
- **Pomoću koordinatnog sustava robota (Cartesian):** U željenim prostornim točkama pohranjuju se informacije o poziciji i orijentaciji TCP-a u odnosu na referentni koordinatni sustav robota (Slika 4.4).

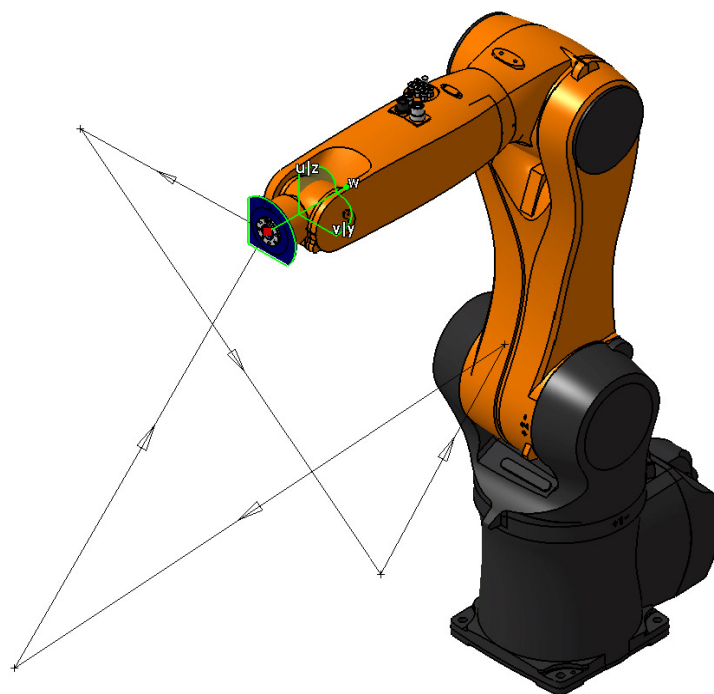
Profil kretanja robota može se vidjeti u Robot Motion editoru, gdje se mogu podesiti neke karakteristike gibanja i eventualno način kretanja robota (Slika 4.5).



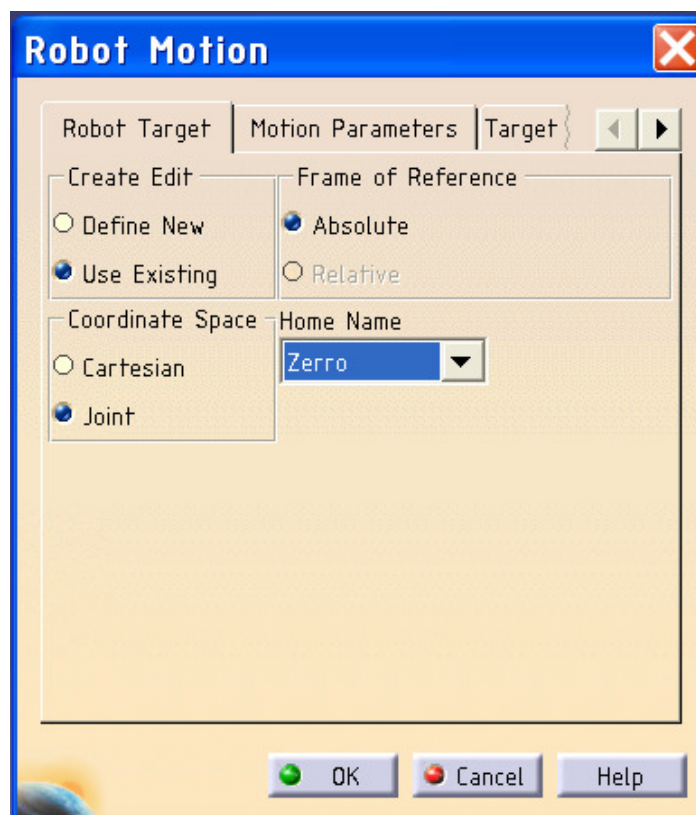
**Slika 4.2** Učenje robota pomoću prostornih markera (tag-ova)



**Slika 4.3** Učenje robota pomoću pomaka zglobova (Joint)



**Slika 4.4** Učenje robota pomoću koordinatnog sustava (Cartesian)



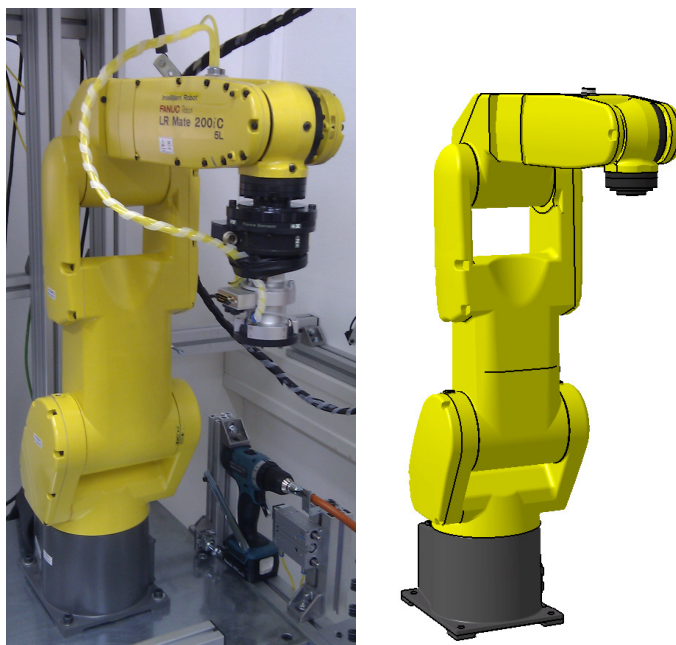
Slika 4.5 Profil kretanja robota

DELMIA u sklopu svojih sučelja nudi i veliku zbirku CAD modela velikog broja proizvođača robota i opreme, uključujući i paletu proizvoda Fanuc i KUKA. No međutim, kako među tim modelima nema i ove modele koji su odabrani za ovaj rad, oni će biti preuzeti sa službenih internet stranica Fanuc-a i KUKA-e, u STEP formatu. S obzirom da STEP model ne sadržava nikakve informacije osim geometrije, morat će posebno definirati kinematika robota, sa svim zglobovima, limitima, brzinama i ubrzanjima, ishodištem koordinatnog sustava, TCP-om i dr. Također treba provjeriti dimenzijsku preciznost CAD modela, tako što će se provjeravati zakreti pojedinih zglobova, pozicija i orijentacija TCP-a u odnosu na koordinatni sustav robota sa zakretima osi, pozicijom i orijentacijom TCP-a stvarnog robota. Također treba usporediti i analizirati eventualna odstupanja CAD modela od realnih robota, te vidjeti da li greška proizlazi iz nepreciznih modela ili se radi o nepreciznosti mjernih sustava samih robota, te eventualno da li se može odstupanje kompenzirati i na koji način. Isto tako treba ispitati i modele alata, ali oni će za razliku od robota biti modelirani sa već unaprijed poznatim TCP-om i točkom (koordinatnim sustavom) spajanja na prihvatnicu robota. U DELMIA-i se alati postavljaju na robota tako da se osi referentnog koordinatnog sustava alata poklope sa osima TCP-a robota.

Ispitivanje odstupanja modela od stvarnog robota vrši se na način da se stvarni robot i model robota dovedu u više istih pozicija (zakreti zglobova su isti) i onda se uspoređuju pozicija i orijentacija TCP-a virtualnog modela i stvarnog robota.

#### 4.1. Ispitivanje modela robota Fanuc LR Mate 200iC5L

U ovom dijelu biti će ispitana točnost računalnog modela robota u usporedbi sa stvarnim, što će se obaviti kroz nekoliko različitih položaja. Prvo će se krenuti sa početnim položajem robota (Home position), (Slika 4.6) te će se usporediti pozicija i orijentacija TCP-a za zadani zakret osi (Tablica 4.1).

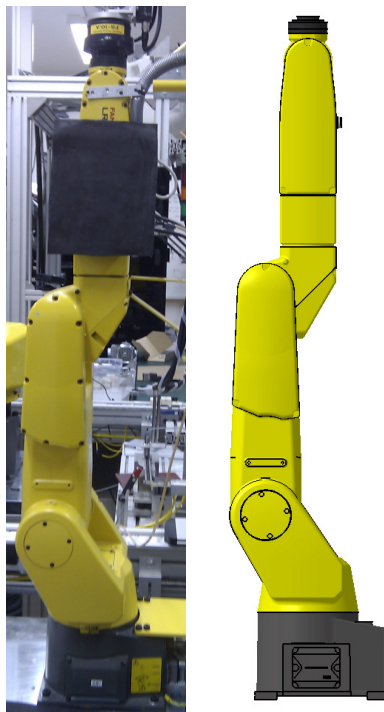


**Slika 4.6** Početni položaj robota LR Mate 200iC5L

LR Mate 200iC5L		CAD model	Stvarni robot
Zakreti osi [°]	Prva os (J1)	0	0
	Druga os (J2)	0	0
	Treća os (J3)	0	0
	Četvrta os (J4)	0	0
	Peta os (J5)	-90	-90
	Šesta os (J6)	0	0
Pozicija TCP-a [mm]	X	485	485
	Y	0	0
	Z	395	395
Orijentacija TCP-a [°]	Rot. X (W)	180	180
	Rot. Y (P)	0	0
	Rot. Z (R)	0	0

**Tablica 4.1** Usporedba pozicije i orijentacije TCP-a CAD modela i stvarnog robota LR Mate 200iC5L u početnom položaju

Slijedeći položaj robota na kojem će se provjeravati točnost CAD modela biti će kada je robot ispružen, tj. položaj u kojemu će osi TCP-a biti paralelne sa osima koordinatnog sustava robota i (Slika 4.7), te će se još jednom usporediti dobivene vrijednosti (Tablica 4.2).



**Slika 4.7** Ispruženi položaj robota LR Mate 200iC5L

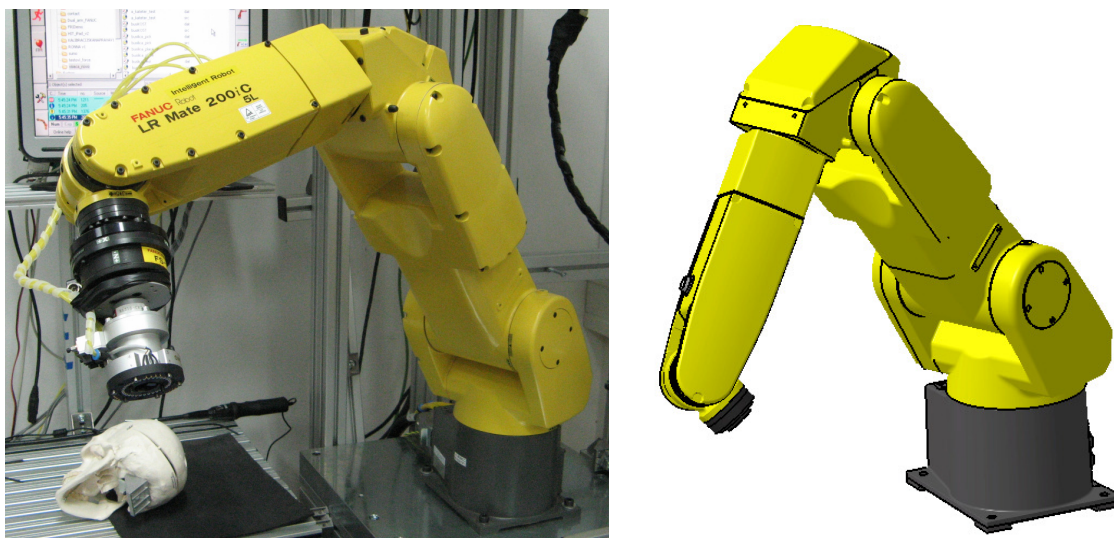
LR Mate 200iC5L		CAD model	Stvarni robot
Zakreti osi [°]	Prva os (J1)	0	0
	Druga os (J2)	0	0
	Treća os (J3)	90	90
	Četvrta os (J4)	0	0
	Peta os (J5)	0	0
	Šesta os (J6)	0	0
Pozicija TCP-a [mm]	X	0	0
	Y	0	0
	Z	890	890
Orijentacija TCP-a [°]	Rot. X (W)	0	0
	Rot. Y (P)	0	0
	Rot. Z (r)	180	180

**Tablica 4.2** Usporedba pozicije i orijentacije TCP-a CAD modela i stvarnog robota LR Mate 200iC5L u ispruženom položaju

Tablica 4.2 još jednom potvrđuje da CAD model robota odgovara stvarnom modelu robota, tj. da se za isti zakret osi dobivaju iste pozicije i orijentacije TCP-a u odnosu na koordinatni sustav robota.

Kod prethodna dva položaja koja su se koristila za usporedbu osi su bile ili u početnim pozicijama (zakret je bio jednak 0) ili su bile zakrenute za 90°. Za treći slučaj biti će odabran još jedan položaj robota, ali ovoga puta sa proizvoljno zakrenutim osima (Slika 4.8), te će se još jednom usporediti dobivene vrijednosti pozicije i orijentacije TCP-a u odnosu na koordinatni sustav (Tablica 4.3).





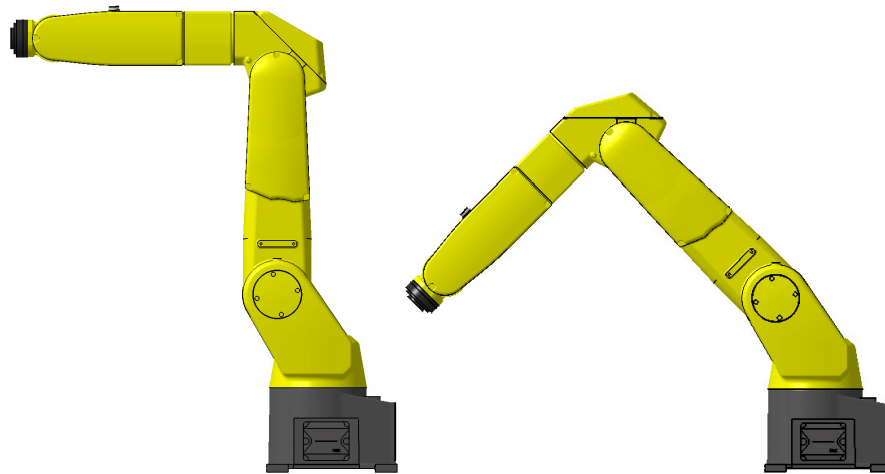
Slika 4.8 Proizvoljni položaj robota LR Mate 200iC5L

LR Mate 200iC5L		CAD model	Stvarni robot
Zakreti osi [°]	Prva os (J1)	-65,967	-65,967
	Druga os (J2)	38,302	38,302
	Treća os (J3)	-15,5	-15,5
	Četvrta os (J4)	-40,205	-40,205
	Peta os (J5)	-66,003	-66,003
	Šesta os (J6)	57	57
Pozicija TCP-a [mm]	X	287,346	350,314
	Y	-528,547	-669,756
	Z	-31,887	213,5
Orijentacija TCP-a [°]	Rot. X (W)	-137,763	-159,441
	Rot. Y (P)	-1,038	-33,443
	Rot. Z (r)	-36,124	-29,3

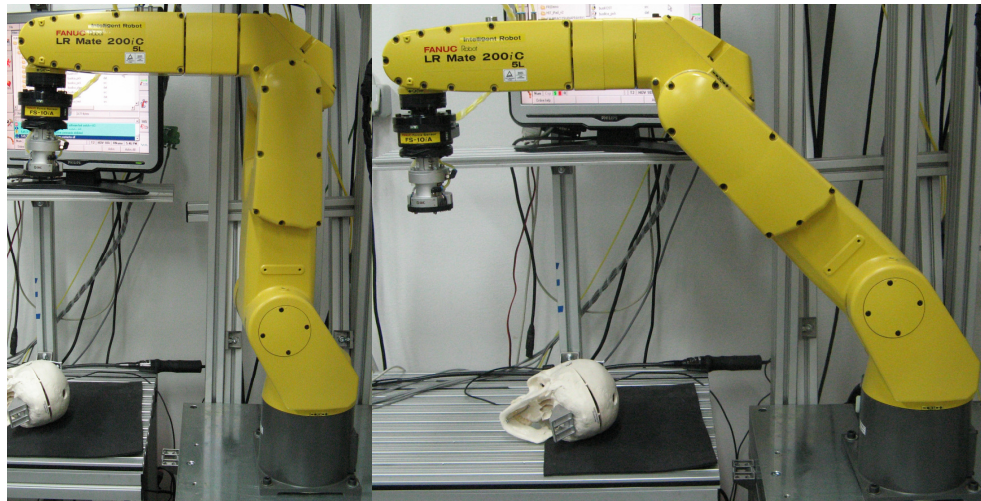
Tablica 4.3 Usporedba pozicije i orijentacije TCP-a CAD modela i stvarnog robota LR Mate 200iC5L u proizvoljno odabranom položaju

Kao što je vidljivo iz Slike 4.8 i Tablice 4.3, ovoga puta za iste zakrete osi smjer i orijentacija TCP-a nisu iste za CAD model i model stvarnog robota. No međutim, to nije zbog greške u CAD modelu, nego se radi o Fanucovu načinu upravljanja osima robota. Kada se zakreće os J2 u DELMIA-i, onda se os J3 (i sve ostale osi koje se u kinematskom lancu nadovezuju na nju) isto tako zakreće, zadržavajući kut u odnosu na os J2 (Slika 4.9), tj. sve slijedeće osi mijenjaju kut zakreta u odnosu na ishodište istovjetno sa osi J2. Na stvarnom modelu robota to je drugačije. Ako se os J2 zakrene za određeni kut u odnosu na ishodišni koordinatni sustav, os J3 će zadržati svoju orijentaciju u odnosu na ishodište (Slika 4.10), tj. napraviti će zakret u odnosu na os J2, ali će u upravljačkoj jedinici i dalje biti prikazano da je os J3 na nuli (tj. kao da nije napravila nikakav zakret oko osi J2).

Ta nastala odstupanja u upravljanju osima robota potrebno je na neki način kompenzirati i ukloniti, kako bi se sve što je napravljeno u virtualnom okruženju moglo na koncu i verificirati na stvarnome modelu.



Slika 4.9 Položaj CAD modela robota ako se os J2 zakrene za 45°



Slika 4.10 Položaj stvarnog modela robota ako se os J2 zakrene za 45°

Ono što je potrebno jest pronaći matematičku vezu između zglobova J2 i J3 CAD modela i stvarnoga modela, tj. jednadžbu prema kojoj će se izračunavati zakret zglobova J3 u CAD modelu kako bi pozicije osi, te pozicija i orijentacija TCP-a odgovarale stvarnome modelu robota.

Jednadžba prema kojoj će se izračunavati zakret osi J3 CAD modela glasi:

$$J3_{SM} = -J2_{CM} + J3_{CM}$$

tj.

$$J3_{CM} = J2_{CM} + J3_{SM}$$

Gdje je:

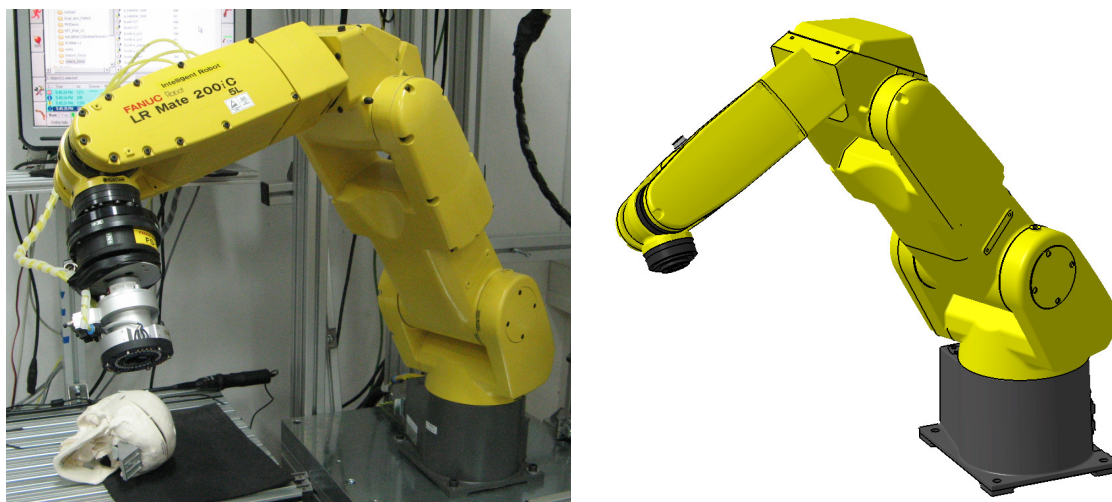
$J3_{CM}$  – Zakret osi J3 na CAD modelu robota

$J2_{CM}$  – Zakret osi J2 na CAD modelu robota

$J3_{SM}$  – Zakret osi J3 na stvarnome modelu robota



Vrijednosti koje se uzimaju u jednadžbu su vrijednosti zakreta pojedinih osi u odnosu na njihovu nulu. Nakon što je dobivena jednadžba koja uspostavlja vezu između zakreta osi CAD modela i stvarnoga modela robota (Slika 4.11), potrebno je još jednom potvrditi i usporediti dobivene rezultate.



**Slika 4.11** Proizvoljni položaj robota LR Mate 200iC5L nakon kompenzacije osi J3

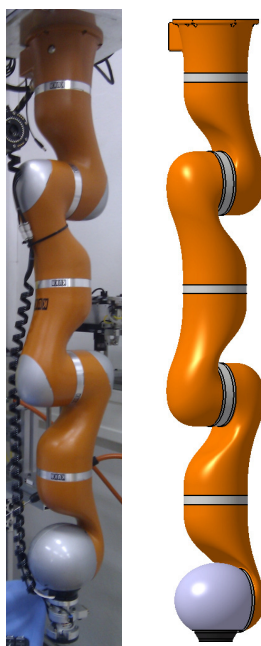
LR Mate 200iC5L		CAD model	Stvarni robot
Zakreti osi [°]	Prva os (J1)	-65,967	-65,967
	Druga os (J2)	38,302	38,302
	Treća os (J3)	22,804 (38,302-15,5)	-15,5
	Četvrta os (J4)	-40,205	-40,205
	Peta os (J5)	-66,003	-66,003
	Šesta os (J6)	57	57
Pozicija TCP-a [mm]	X	350,365	350,314
	Y	-669,872	-669,756
	Z	213,139	213,15
Orijentacija TCP-a [°]	Rot. X (W)	-159,469	-159,441
	Rot. Y (P)	-33,488	-33,443
	Rot. Z (r)	-29,342	-29,3

**Tablica 4.4** Usporedba pozicije i orijentacije TCP-a CAD modela i stvarnog robota LR Mate 200iC5L u proizvoljno odabranom položaju nakon kompenzacije osi J3

Iz Tablice 4.4 je vidljivo da su nakon provedene kompenzacije osi J3 po dobivenoj formuli, odstupanja manja od 0,15 mm što može biti posljedica nesavršenog mjernog sustava stvarnog modela robota, ili čak sama odstupanja u preciznosti CAD modela. No međutim, ova preciznost je i više nego zadovoljavajuća (dopuštena odstupanja ne smiju iznositi više od 0,5 mm), pa će se uzeti da CAD model i stvarni model robota odgovaraju jedan drugome i da su odstupanja zanemariva za problem koji se rješava.

## 4.2. Ispitivanje modela robota KUKA LBR4

Na modelu robota KUKA LBR4 će se provesti istovjetno ispitivanje kao na Fanucu, u svrhu provjere i verifikacije CAD modela u odnosu na stvarni model. Isto će se odabrati nekoliko različitih položaja robota te će se provjeravati položaj i orijentacija TCP-a. Početna pozicija (Home position) neće se moći ispitati zbog skućenog prostora u kojem je robot nalazi, te on ne može doći u taj položaj zbog kolizije. S toga će se krenuti sa ispruženom pozicijom robota gdje su sve osi u početnom položaju osim osi A2 koja će biti zakrenuta za  $90^\circ$  (Slika 4.12) i usporediti će se pozicija i orijentacija TCP CAD modela sa stvarnim modelom robota (Tablica 4.5)



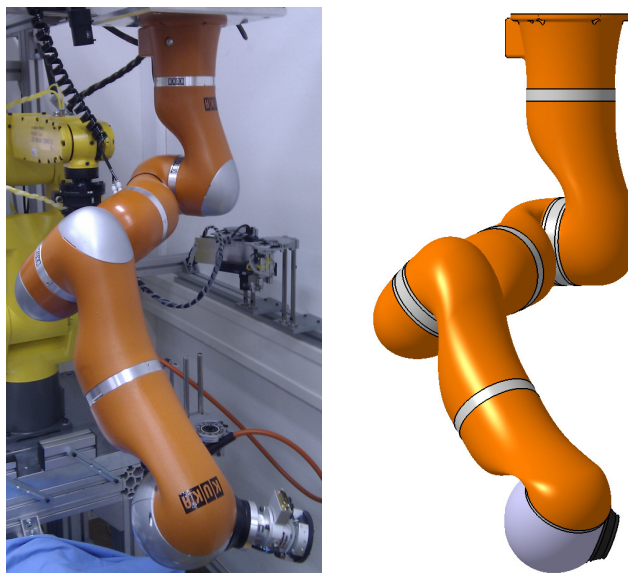
Slika 4.12 Ispuženi položaj robota LBR4

LBR4		CAD model	Stvarni robot
Zakreti osi [°]	Prva os (J1)	0	0
	Druga os (J2)	90	90
	Treća os (J3)	0	0
	Četvrta os (J4)	0	0
	Peta os (J5)	0	0
	Šesta os (J6)	0	0
	Sedma os (E1)	0	0
Pozicija TCP-a [mm]	X	0	0
	Y	0	0
	Z	1178,5	1178,5
Orijentacija TCP-a [°]	Rot. X (W)	0	0
	Rot. Y (P)	0	0
	Rot. Z (r)	0	0

Tablica 4.5 Usporedba pozicije i orijentacije TCP-a CAD modela i stvarnog robota LBR4 u ispruženom položaju

Tablica 4.5 pokazuje da CAD model u potpunosti odgovara stvarnom modelu robota, no da bi se sa sigurnosti to moglo tvrditi, potrebno je provjeriti još različitih pozicija kako bi se mogli verificirati dobiveni rezultati ispitivanja.

Slijedeći položaj robota na kojem će se provjeravati točnost CAD modela biti će sa proizvoljno zakrenutim osima (Slika 4.13), te će se još jednom usporediti dobivene vrijednosti pozicije i orijentacije TCP-a u odnosu na koordinatni sustav (Tablica 4.6).

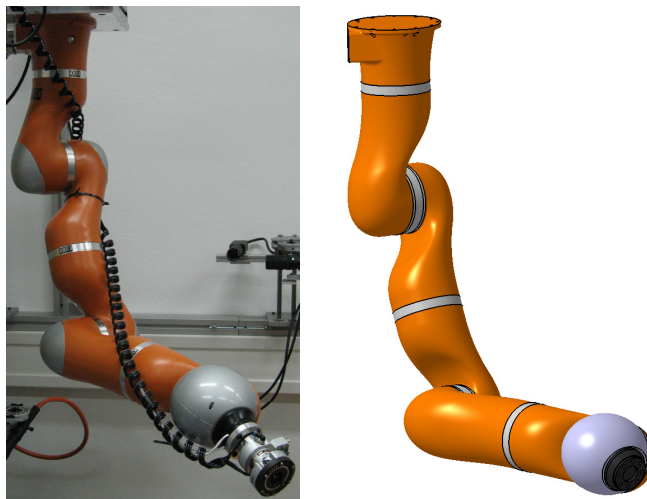


**Slika 4.13** Prvi proizvoljni položaj robota LBR4

LBR4		CAD model	Stvarni robot
Zakreti osi [°]	Prva os (J1)	55,08	55,08
	Druga os (J2)	168,61	168,61
	Treća os (J3)	68,59	68,59
	Četvrta os (J4)	22,51	22,51
	Peta os (J5)	-54,92	-54,92
	Šesta os (J6)	-41,06	-41,06
	Sedma os (E1)	39,99	39,99
Pozicija TCP-a [mm]	X	-487,591	-487,60
	Y	-187,069	-186,99
	Z	714,820	-714,84
Orijentacija TCP-a [°]	Rot. X (C)	-71,501	-71,51
	Rot. Y (B)	8,009	8,01
	Rot. Z (A)	21,057	21,06

**Tablica 4.6** Usporedba pozicije i orijentacije TCP-a CAD modela i stvarnog robota LBR4 u prvom proizvoljno odabranom položaju

Iz Tablice 4.6 vidi se da određena odstupanja ipak postoje i kreću se u rasponu od 0,03 do 0,09 mm, i da bi se sa većom preciznosti mogla odrediti odstupanja CAD modela od stvarnog robota, ispitat će se još jedan položaj robota, sa isto tako proizvoljno odabranim kutovima (Slika 4.14) te će se isto tako usporediti pozicija i orijentacija TCP-a CAD modela sa modelom stvarnog robota (Tablica 4.7).



**Slika 4.14** Drugi proizvoljni položaj robota LBR4

LBR4		CAD model	Stvarni robot
Zakreti osi [°]	Prva os (J1)	-125,990	-125,990
	Druga os (J2)	68,010	68,010
	Treća os (J3)	65,070	65,070
	Četvrta os (J4)	165,720	165,720
	Peta os (J5)	-18,110	-18,110
	Šesta os (J6)	19,170	19,170
	Sedma os (E1)	-6,09	-6,09
Pozicija TCP-a [mm]	X	-389,245	389,28
	Y	-471,869	471,86
	Z	729,302	729,26
Orijentacija TCP-a [°]	Rot. X (C)	-4,022	-4,02
	Rot. Y (B)	-69,576	-69,58
	Rot. Z (A)	58,195	58,19

**Tablica 4.7** Usporedba pozicije i orijentacije TCP-a CAD modela i stvarnog robota LBR4 u drugom proizvoljno odabranom položaju

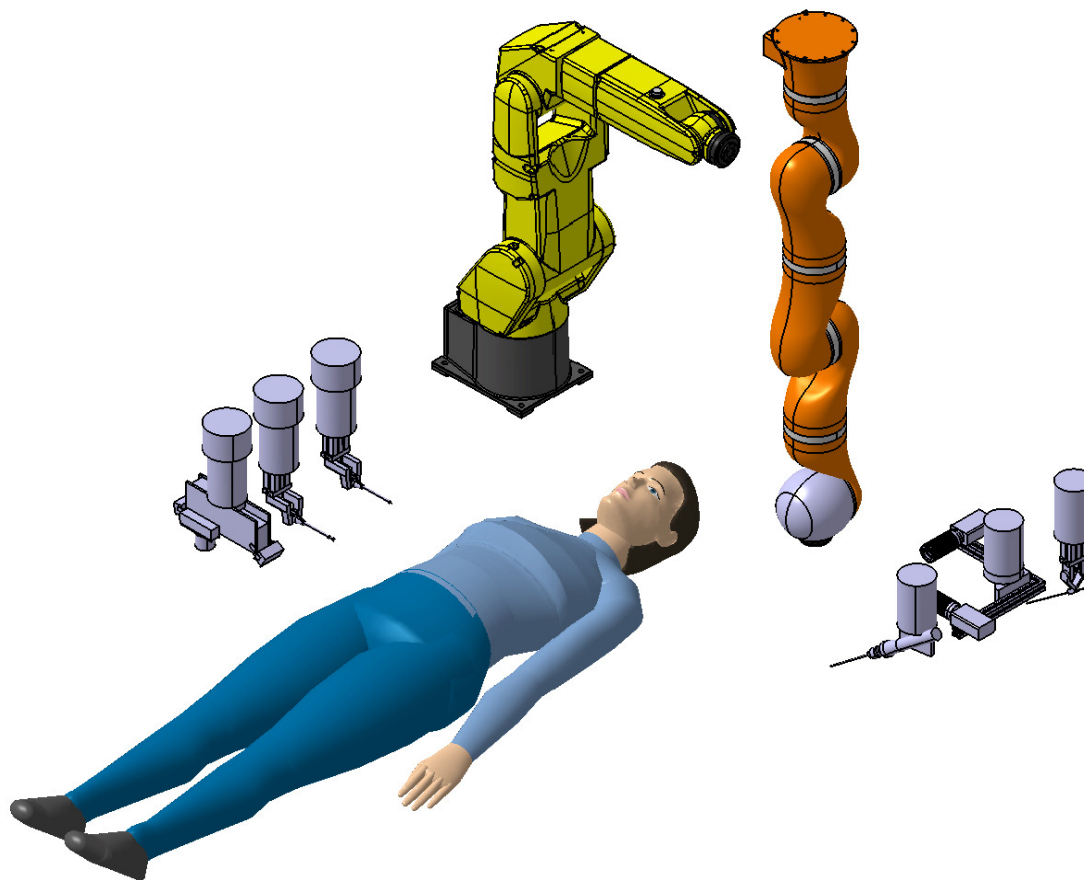
I na trećem primjeru se vidi da određena odstupanja ipak postoje, i kreću se u rasponu do 0.04 mm 0,04, te se na temelju sva tri ispitivanja može zaključiti da su odstupanja manja od 0,1 mm, što je značajno manje od dopuštenih 0,5 mm.

Na temelju ispitivanja obaju robota (Fanuc LR Mate 200iC5L i KUKA LBR4) može se reći da su modeli savršeno precizni ako su osi zakrenute za 0,  $\pi/2$ ,  $\pi$  ili  $2\pi$  radijana, ali ukoliko se radi o nasumično odabranim zakretima (kutovi zakreta mogu poprimiti bilo koju vrijednost unutar limita pojedine osi) vidljivo je na primjerima da se javljaju određena odstupanja od stvarnih modela. Ta odstupanja mogu biti uzrokovana ili nepreciznim mjernim sustavima samih robota, ili nepreciznom izradom CAD modela robota, no međutim, ta su odstupanja i više nego dovoljno manja od maksimalno dopuštenih odstupanja koja iznose 0.5 mm ( $\pm 0,25$  mm) te se stoga mogu slobodno zanemariti, te možemo reći da CAD modeli robota odgovaraju stvarnim modelima robota, te možemo nastaviti sa daljnjom analizom problema.

Stvarni model robota KUKA KR6 R900 nije dostupan za ispitivanje preciznosti CAD modela, te će stoga taj dio biti izostavljen.

### 4.3. Ispitivanje međusobne pozicije robota i alata

Nakon što su ispitani CAD modeli i uspoređeni sa stvarnim modelima robota, te su dobivena odstupanja, može se prijeći na slijedeći korak a to je postavljanje robota u međusoban položaj, dodjeljivanje im alata te ispitivanje odstupanja. To će se biti napravljeno u *Device Task Definition* sučelju, u kojemu se definiraju resursi, produkti, njihove pozicije i položaji, dodjeljuju im se alati, definiraju se zadaće koje resursi moraju obaviti sa ili na produktima (Slika 4.15).

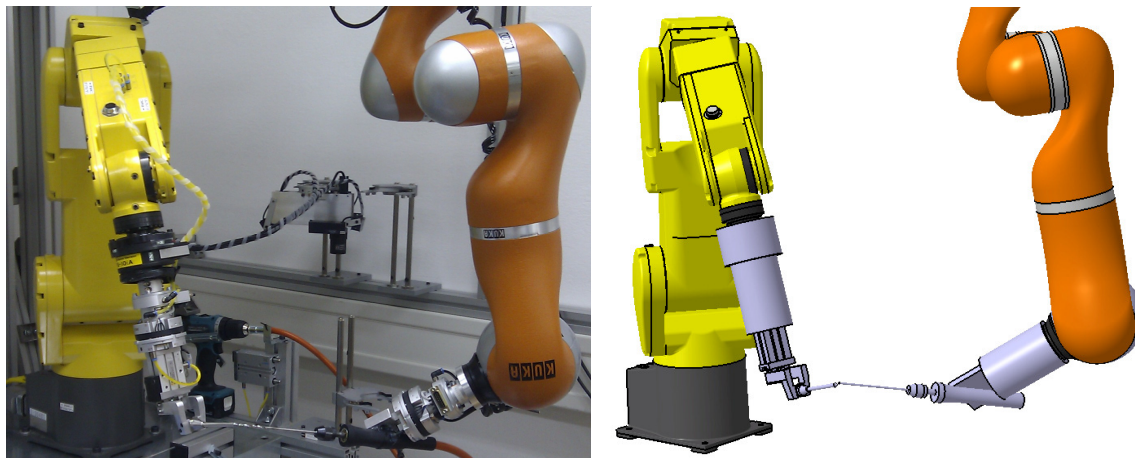


Slika 4.15 Raspored resursa i produkata u DELMIA-i

U ovome sučelju roboti mogu prihvaćati alate koji su im dodijeljeni, te upravljati kinematikom robota upravo preko pozicija i orijentacija TCP-a tih alata. U slijedećem će se koraku na stvarne modele robota staviti alati, dotaknuti vrhovi alata obaju robota, to isto učiniti sa CAD modelima robota (Slika 4.16), te će se dobivene vrijednosti usporediti (Tablica 4.8). Rezultati ove analize dati će nam točniju sliku o međusobnoj udaljenosti i orijentaciji obaju robota, eventualna odstupanja CAD modela u odnosu na stvarne modele robota, te isto tako će nam reći s kojom preciznošću su izmjereni i kompenzirani alati obaju robota.



S obzirom da su se CAD modeli alata izrađivali prema poznatim pozicijama TCP-a alata u odnosu na točku spajanja na prihvatnicu robota, može se smatrati da su oni točni koliko su točne kompenzacije stvarnih alata i koliko je precizan mjerni sustav robota. Ispitivanje će se provesti sa dva različita međusobna položaja robota kako bi se dobila što bolja predodžba o stvarnim odstupanjima.

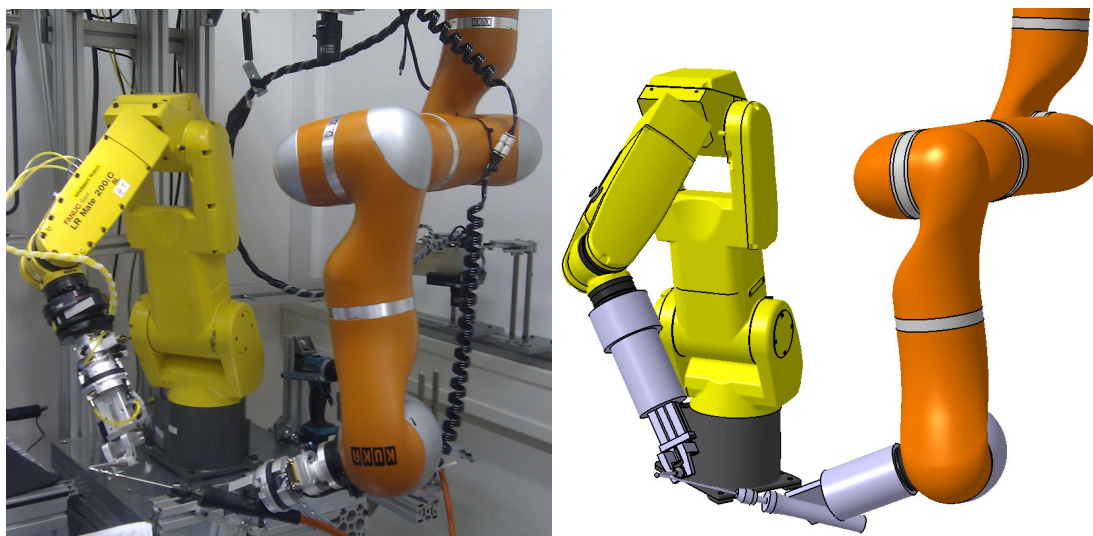


**Slika 4.16** Prvi međusobni položaj robota u kojem im se dodiruju vrhovi alata

		LR Mate 200iC5L		LBR4	
		CAD model	Stvarni robot	CAD model	Stvarni robot
Zakreti osi [°]	Prva os	-38,485	-38,485	-132,370	-132,37
	Druga os	11,227	11,227	-1,200	-1,20
	Treća os	-20,649 (11,227-31,876)	-31,876	92,050	92,05
	Četvrta os	-12,100	-12,100	104,990	104,99
	Peta os	-46,296	-46,296	67,730	67,73
	Šesta os	214,143	214,143	19,170	19,17
	Sedma os	-	-	-170,19	-170,19
Pozicija TCP-a [mm]	X	657,661	657,66	-254,749	-254,78
	Y	-379,867	-379,985	-275,392	-275,42
	Z	-70,169	-70,006	727,117	727,10
Orijentacija TCP-a [°]	Rot. X	-0,016	-0,015	-23,282	-23,29
	Rot. Y	14,880	14,88	-55,352	-55,35
	Rot. Z	165,293	165,292	-178,282	-178,27

**Tablica 4.8** Izmjerene vrijednosti pozicije i orijentacije dodira TCP-a alata CAD modela i stvarnih modela robota za prvi položaj

Radi preciznijeg određivanja odstupanja CAD modela i stvarnih modela robota, biti će provedena još jedna analiza, sa drugačijim zakretima osi obaju robota, ali u poziciji gdje im se još uvijek dodiruju vrhovi alata (Slika 4.17) te će se dobiveni rezultati CAD modela još jednom usporedi sa stvarnim modelom robota (Tablica 4.9). Naravno, da bi se dobili precizniji podaci potrebno je izvršiti više mjerenja, no za rješavanje ovoga problema biti će dovoljno još jedno ispitivanje kako bi se verificirali dobiveni rezultati i kako bi mogli sa sigurnošću odgovoriti na pitanje da li ovaj model zadovoljava, tj. da li su mu odstupanja unutar zadanih tolerancija.



**Slika 4.17** Drugi međusobni položaj robota u kojem im se dodiruju vrhovi alata

		LR Mate 200iC5L		LBR4	
		CAD model	Stvarni robot	CAD model	Stvarni robot
Zakreti osi [°]	Prva os	-56,098	-56,098	-111,68	-111,68
	Druga os	15,018	15,018	1,7	1,7
	Treća os	-21,256 (15,018-36,274)	-36,274	90,2	90,2
	Četvrta os	-43,871	-43,871	74,25	74,25
	Peta os	-51,151	-51,151	72,37	72,37
	Šesta os	220,033	220,033	19,17	19,17
	Sedma os	-	-	-170,21	-170,21
Pozicija TCP-a [mm]	X	596,366	596,627	-149,871	-149,88
	Y	-515,660	-515,699	-377,428	-377,48
	Z	-54,053	-53,919	742,570	742,55
Orijentacija TCP-a [°]	Rot. X	-28,342	-28,342	-33,349	-33,36
	Rot. Y	15,313	15,313	-56,360	-56,36
	Rot. Z	129,522	129,522	-179,332	-179,32

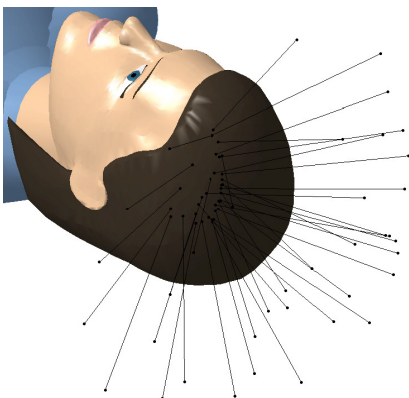
**Tablica 4.9** Izmjerene vrijednosti pozicije i orijentacije dodira TCP-a alata CAD modela i stvarnih modela robota za drugi položaj

Iz obadviju analiza (Tablica 4.8 i Tablica 4.9) vidljivo je da se odstupanja CAD modela od stvarnog modela robota kreću u rasponu od 0,001 do 0,15 mm, što je manje od dopuštenog odstupanja koje iznosi 0,5 mm ( $\pm 0,25$  mm) i nalazi se unutar dopuštenih tolerancija, pa se stoga može slobodno reći da CAD modeli imaju zadovoljavajuću točnost u odnosu na stvarne modele robota i da se sa istima mogu provoditi daljnje analize i ispitivanja.

Dopuštena odstupanja koja su uzeta u ovome radu, nisu proizvoljno odabrana. To su odstupanja, odnosno dopuštena greška u putanji kretanja robota za promatrani neurokirurški zahvat. Sva veća odstupanja smatrala bi se opasnim po zdravlje i život pacijenta, stoga se izrazito vodilo računa da sve greške i odstupanja budu unutar dopuštenih granica, a ukoliko bi se i pojavilo neko veće odstupanje, onda bi model bio proglašen neispravnim i išlo se u prepravke istoga.

## 5. ISPITIVANJE TRAJEKTORIJA KRETANJA ALATA

U ovome poglavlju biti će ispitane trajektorija kretanja alata, te pozicije robota u odnosu na pacijenta. Cilj je pronaći pozicije u kojima roboti mogu zahvatiti cijelo područje kranija na kojem će se obavljati operativni zahvati, te da mogu izvršiti zahtijevane radnje kretanja po unaprijed određenim putanjama bez naglih zakreta i pokreta koji bi mogli ugroziti zdravlje ili život pacijenta (Slika 5.1).



**Slika 5.1** *Trajektorije kretanja alata*

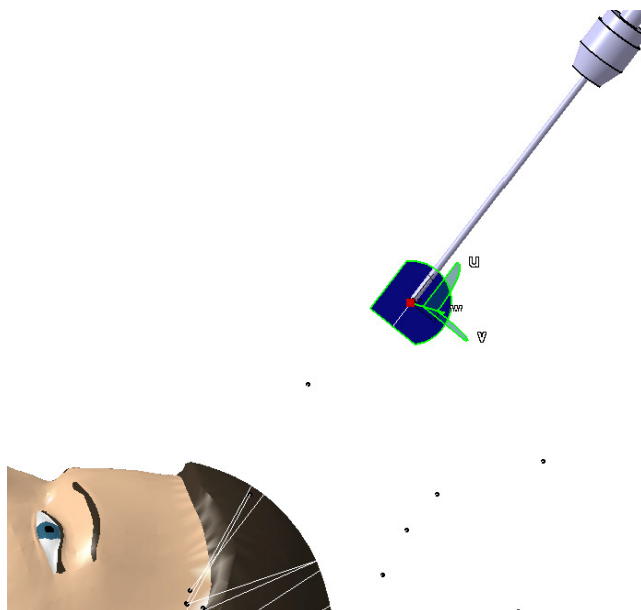
Cijeli proces ispitivanja putanja i pozicija robota će se odvijati tako da će se osi alata morati poklapati sa definiranim trajektorijama i po njima će se obavljati određene kretnje. Moraju biti ispitane međusobne pozicije robota i pacijenta te da li roboti mogu obaviti sve potrebne kretnje i sa kojim zakretima pojedinih osi, te pronaći najbolju poziciju za pacijenta. Posebna pozornost će se obratiti i na kolizije robota sa pacijentom. S obzirom da su roboti u fiksnom položaju u prostoru, manipulirati će se isključivo položajem, pozicijom i orijentacijom pacijenta. Biti će ispitane pozicije kada je pacijent u ležećem položaju (horizontalno) i pod kutom od  $30^\circ$  (Slika 5.2).



**Slika 5.2** *Položaji pacijenta na kojima koje će se ispitivati putanje kretanja alata*

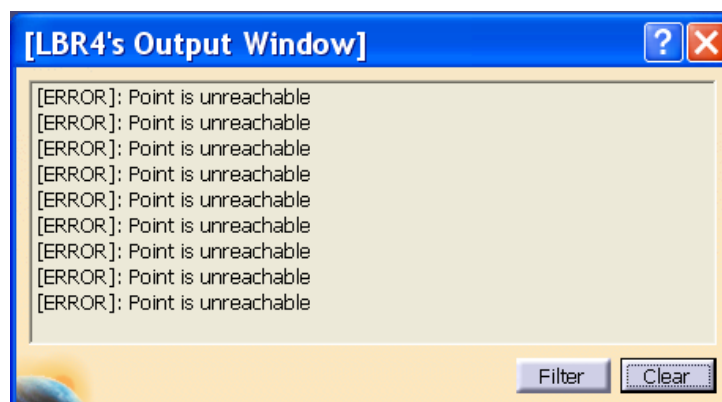


DELMIA je iznimno pogodan i moćan alat za takva ispitivanja, jer pruža jedan vrlo fleksibilan i intuitivan pristup rješavanju problema. Na trajektorije će se dodjeljivati prostorni markeri (tag), koji će definirati poziciju i orijentaciju TCP-a vrha alata (Slika 5.3).

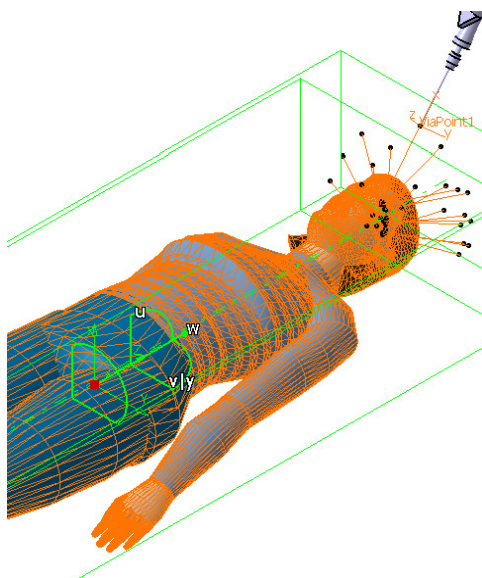


Slika 5.3 Pozicija i orijentacija TCP-a alata na pacijentu

Ukoliko robot zbog ograničenja zakreta na osima ne može ni na koji način doći u željenu poziciju, DELMIA nas automatski o tome obavještava (Slika 5.4). To nam govori da pozicija i orijentacija TCP-a nisu dobre te da ih treba mijenjati. S obzirom da su pozicije markera vezane za trajektorije, koje su pak definirane pozicijom pacijenta, pozicija markera ovisiti će o poziciji samoga pacijenta. Dakle, pozicija markera će se mijenjati tako da će se mijenjati pozicija samoga pacijenta u odnosu na robota (Slika 5.5), dok će se orijentacija markera mijenjati pomoću *Tag Transformation* naredbe. Ona nam omogućava da proizvoljno pomicemo i zakrećemo markere po prostoru, neovisno o drugim objektima. Markeri se mogu razmještati po prostoru bilo pomoću kompasa ili upisivanjem koordinata i zakreta oko osi globalnog koordinatnog sustava (Slika 5.6).



Slika 5.4 Obavijest o dosežnosti točke u prostoru



Slika 5.5 Pozicioniranje pacijenta, trajektorija i prostornih markera

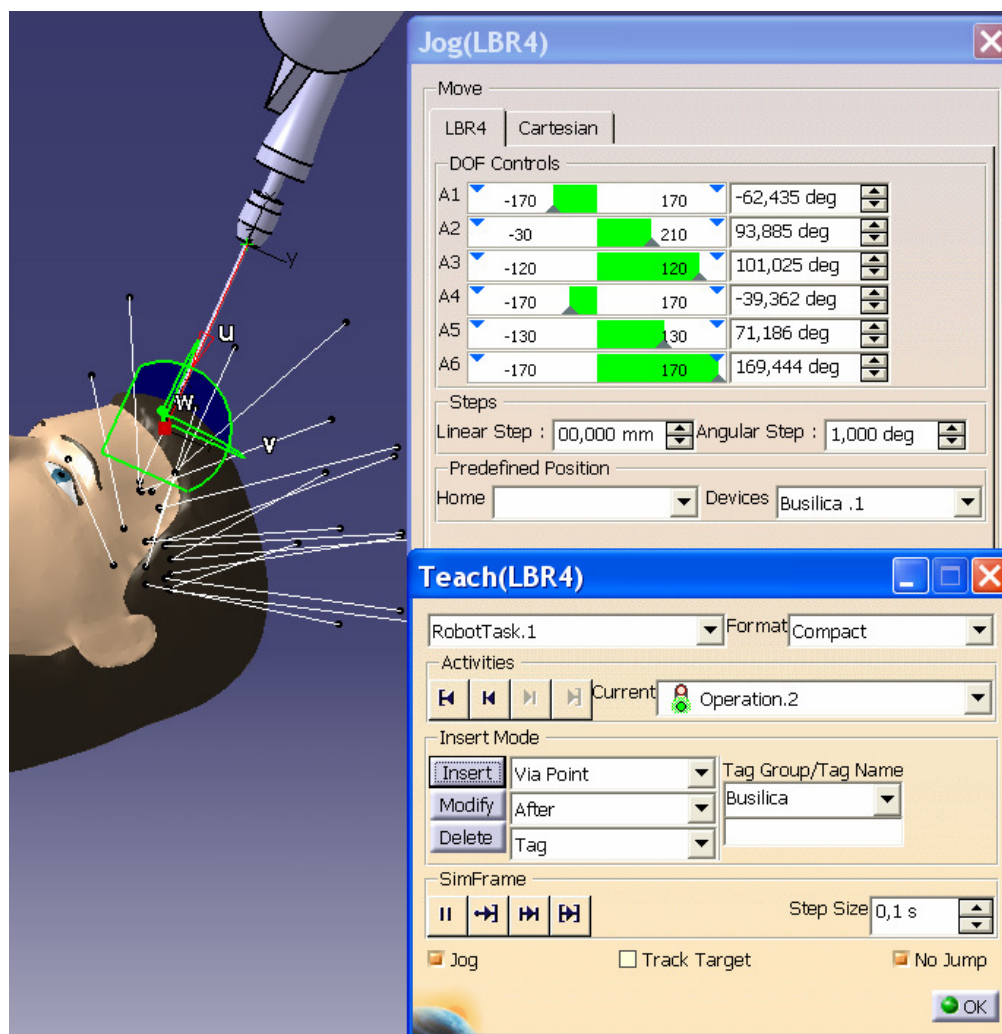


Slika 5.6 Definiranje pozicije i orijentacije markera pomoći Tag Transformation editora

Nakon što je definirana prvi marker u prostoru, potrebno je odabrati *Teach a device* naredbu koja otvara editore za prostornu manipulaciju robotom i učenje (Slika 5.7). Robotom se može manipulirati na tri načina:

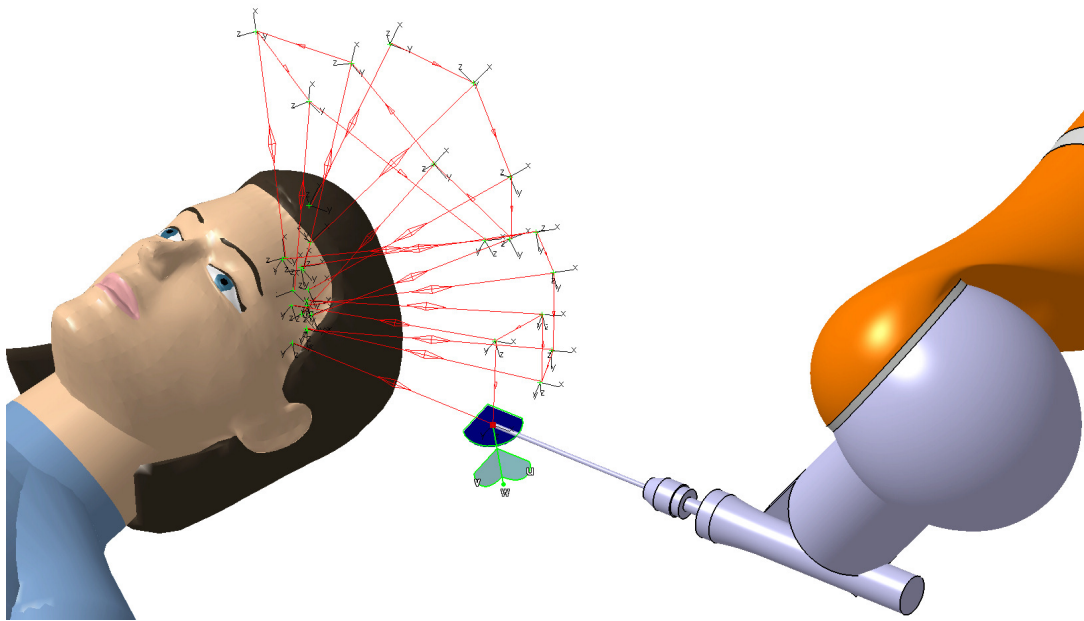
1. Pomoću prostornog kompasa – kompas je sa svojim osima pozicioniran i zakrenut prema TCP-u alata, te se ručnom manipulacijom kompasa (translacije i rotacije oko TCP-a) po prostoru manipulira i TCP-o, odnosno cijelim robotom (rješenje inverznog kinematičkog problema).
2. Pomoću zglobova – Svakom zglobu se posebno definira zakret oko osi rotacije te se na taj način robot dovodi u željenu poziciju (rješenje direktnog kinematičkog problema).
3. Pomoću koordinatnog sustava (Cartesian) – upisuju se koordinate položaja i zakreti oko osi globalnog koordinatnog sustava kako bi se odredili pozicija i orijentacija TCP-a (rješenje inverznog kinematičkog problema).

Prilikom manipulacije robotom treba voditi računa da robot ne izađe van svojih limita zakreta osi. To je moguće kontrolirati u *Jog* editoru, pomoću kontrola zglobova. Dokle god se kompas pomiče po prostoru, istovremeno se mijenjaju zakreti osi robota, i sve dok su kontrole zelene, to znači da su zglobovi unutar svojih limita kretanja. Ukoliko pojedini zglob izađe van limita, kontrola tog istog zgloba se zacrveni, i ostaje crvena sve dok se zglob ne vrati unutar svojih dopuštenih granica. Kada se TCP dovede u željeni položaj, i ako su svi zglobovi zeleni (unutar svojih limita kretanja), u *Teach* editoru se pomoću naredbe *Insert* dodjeljuje trenutna pozicija i orijentacija TCP-a kao prostorni marker, i automatski se pohranjuje u program robota kao slijedeća točka u koju robot mora stići (Slika 5.7).



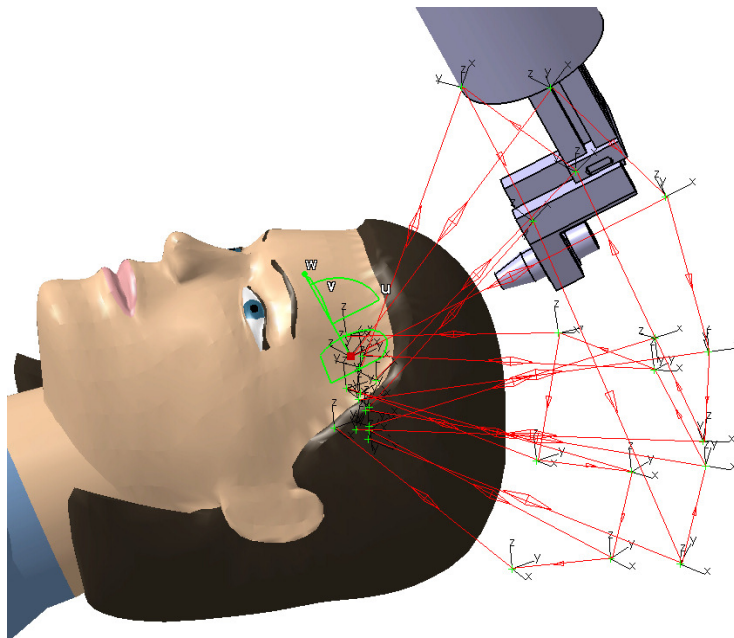
Slika 5.7 Editor za prostornu manipulaciju robotom i učenje

Na gore opisan način dodjeljuju se, ispituju i prilagođavaju sve prostorne točke i markeri u koje robot mora doći kako bi obavio potrebnu zadaću, te se verificiraju putanje kretanja alata (Slika 5.8). Ukoliko robot u bilo kojem trenutku bude van svojih limita, automatski se pojavljuje prozor koji o tome obavještava (Slika 5.4). Pomoću *Robot Task Simulation* naredbe moguće je i provesti simulaciju kretanja robota i alata po definiranoj putanji.

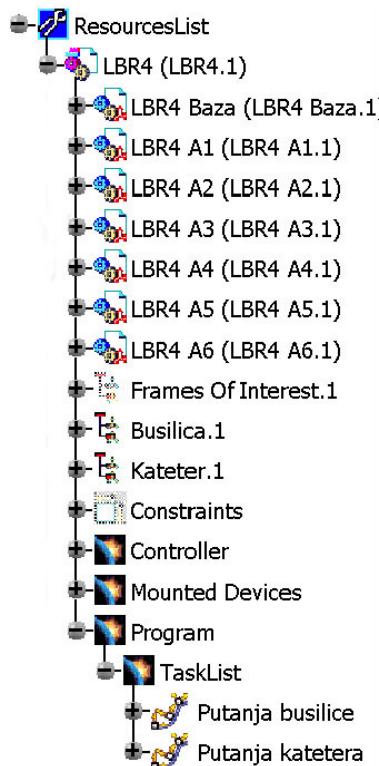


**Slika 5.8** Putanja kretanja TCP-a alata robota KUKA po prostoru dok je pacijent u ležećem položaju

Ista ta procedura mora se provesti za sve alate i robote (Slika 5.9). No međutim, kako se ne bi moralo ponovno definirati sve prostorne markere, moguće je kopirati već postojeće te im eventualno promjeriti orijentaciju kako bi odgovarali orijentaciji TCP-a drugog alata, te ih dodijeliti drugome zadatku (Task). Lista zadataka može se vidjeti u specifikacijskom stablu pod *Program – TaskList* (Slika 5.9).

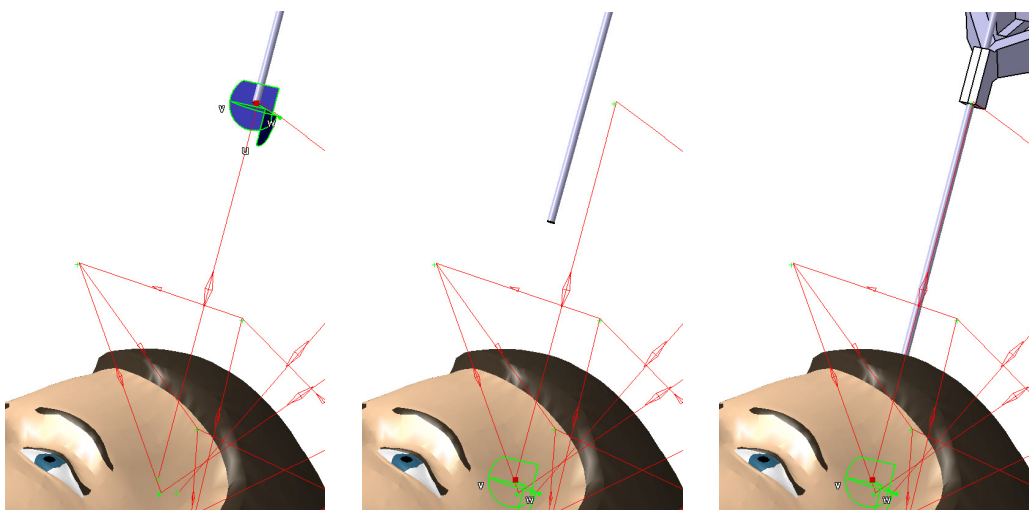


**Slika 5.9** Putanja kretanja TCP-a alata robota Fanuc po prostoru dok je pacijent u ležećem položaju



Slika 5.10 Specifikacijsko stablo

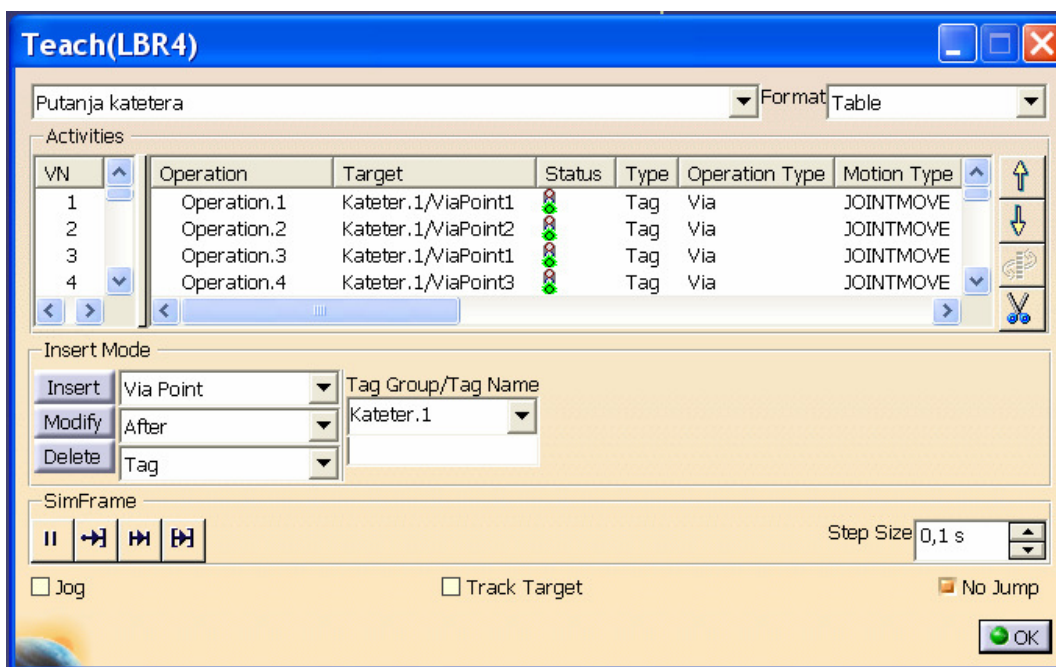
Posebnu pozornost potrebno je obratiti na ulazak i izlazak alata iz kranija. Iako su orijentacije TCP-a u krajnjim točkama trajektorija iste, i iako se prilikom učenja robota kompas pomicao linearno (u smjeru osi x TCP-a), to nužno ne znači da će se alat tako i kretati (linearno). Ono što je robot naučio jest početna točka i krajnja točka te orijentacija TCP-a u tim točkama, no međutim putanja alata i zakreti TCP-a na putu između tih točaka definirani su preko kinematike zglobova robota, što znači da prilikom kretanja mogu postojati određena odstupanja od zadane trajektorije (Slika 5.11).



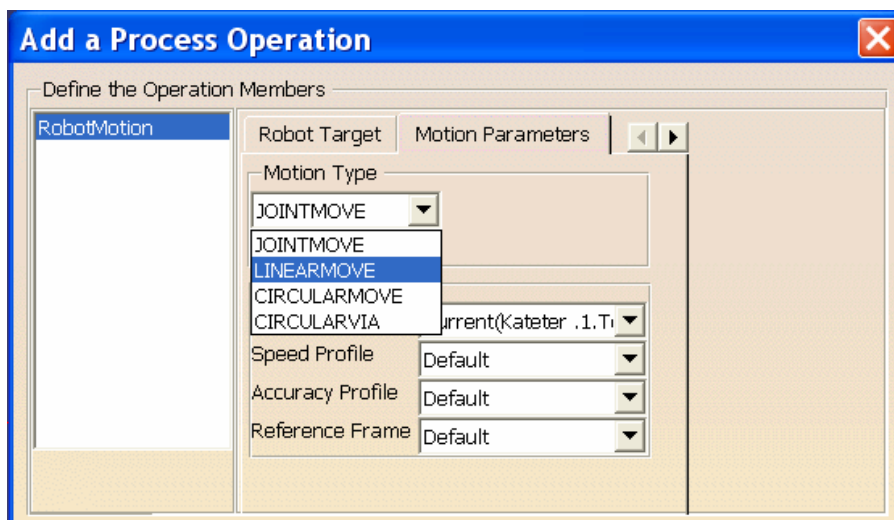
Slika 5.11 Odstupanje putanje TCP-a od zadane trajektorije



To odstupanje putanje alata od zadane trajektorije se ispravlja na taj način, da se u *Teach* editoru (Slika 5.7) Pod opcijom *Format* umjesto *Compact* odabere opcija *Table*, što otvara tablični prikaz editora u kojemu su prikazane sve operacije i sve postavke i karakteristike vezane uz pojedinu operaciju (Slika 5.12). U stupcu *Motion Type* vidi se da su sve operacije definirane kao JOINTMOVE, što znači da su kretnje definiranje preko zglobova, tj. da robot podjednako pomiče sve zglobove istovremeno istim brzinama, što i uzrokuje odstupanje putanje TCP-a od zadane trajektorije. Da bi se to promijenilo, treba selektirati odabranu operaciju (dvoklik mišem) što otvara *Add a Process Operation*, te u padajućem izborniku *Motion Type* odabrati opciju LINEARMOVE (Slika 5.13).

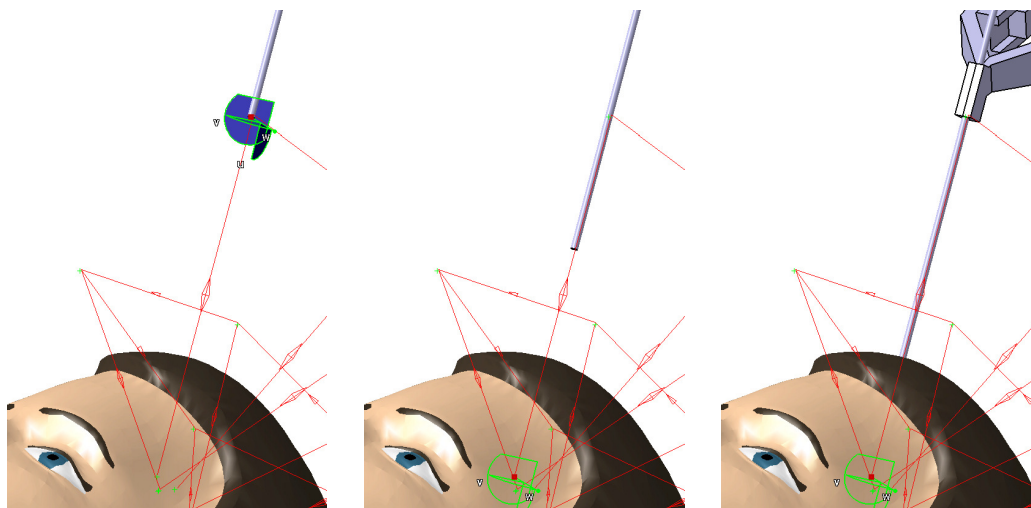


Slika 5.12 Tablični prikaz Teach editora



Slika 5.13 Definiranje putanje TCP-a prilikom izvođenja pojedine operacije

Nakon što su ulasci i izlasci alata iz kranija promijenjeni u linearna gibanja, odstupanja TCP-a od zadanih trajektorija više ne bi smjelo biti, jer se sada os alata giba tako da se cijelo vrijeme poklapa sa zadanom trajektorijom, tj. orijentacija TCP-a cijelo vrijeme ostaje nepromijenjena ( $\text{rot. } x, \text{rot. } y, \text{rot. } z = \text{const.}$ ) (Slika 5.14). Treba napomenuti da je potrebno promijeniti gibanja samo operacijama ulaska i izlaska iz kranija, jer je za njih nužno da budu linearne, dok je operacije u kojima robot prelazi sa jedne trajektorije na drugu poželjno ostaviti da kretanja ostanu definirana preko zglobova kako bi robot mogao zauzeti poziciju i orijentaciju sa najpovoljnijim zakretima kutova osi. Te operacije se izvode u otvorenom prostoru izvan kranija pa manja odstupanja od trajektorija nisu od presudne važnosti, ali ipak treba pripaziti da prilikom promjene pozicije i orijentacije ne dođe do neželjenih kolizija sa pacijentom ili drugim robotom.

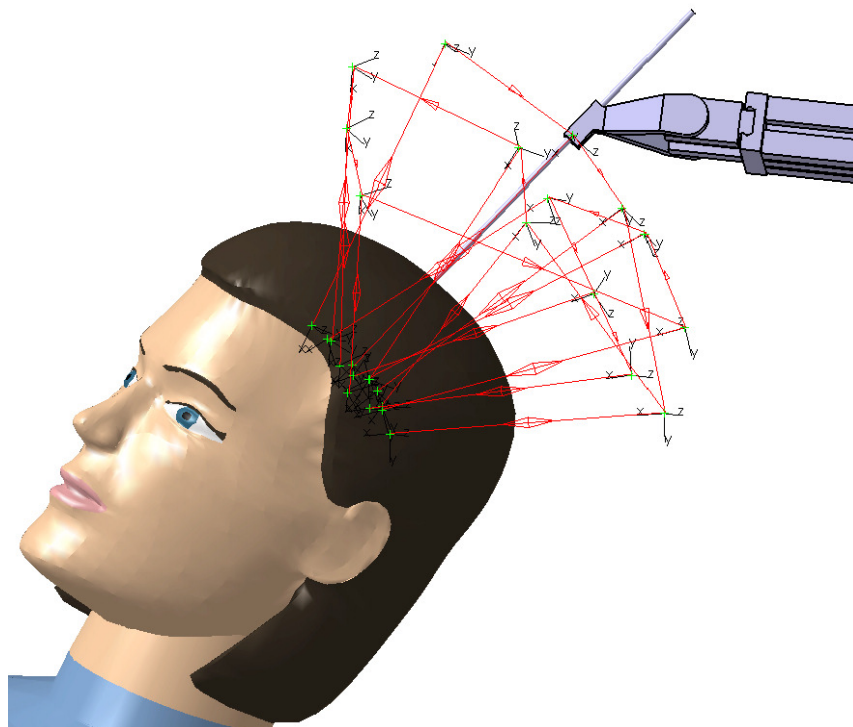


**Slika 5.14** Putanja TCP-a bez odstupanja od zadane trajektorije

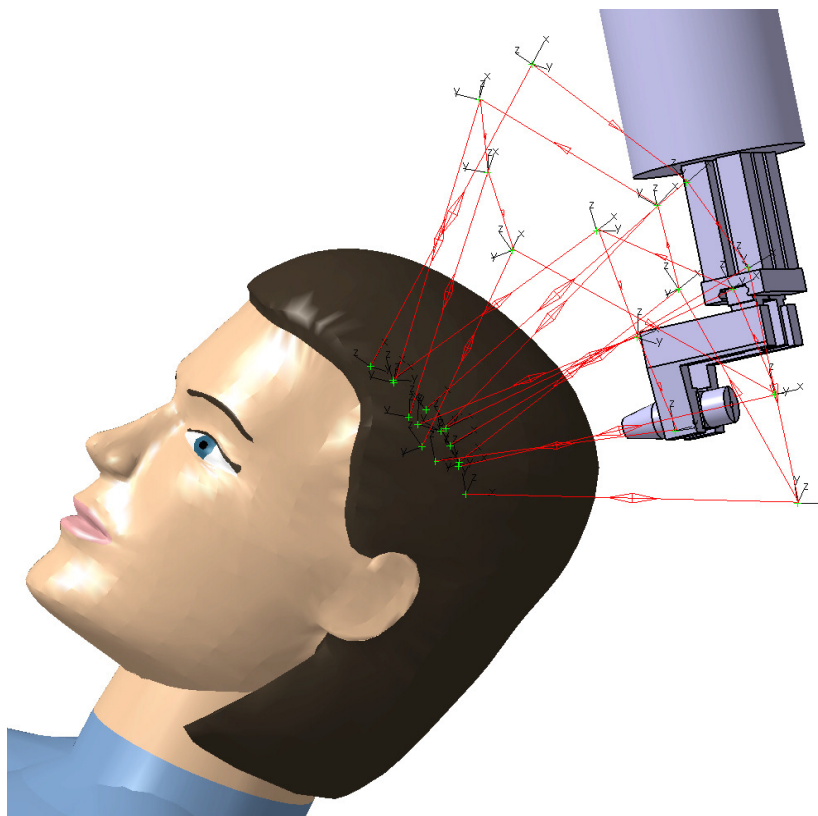
S time bi bilo završeno ispitivanje pozicija robota i putanja kretanja alata kada je pacijent u ležećem položaju. Ono što još treba napraviti jest ispitati pozicije robota i putanje alata kada je pacijent položen pod kutom od  $30^\circ$  (Slika 5.16 i Slika 5.17). Postupak će biti isti i slijediti će se iste procedure i pravila kao i kada je pacijent bio polegnut horizontalno. Nužnost ovoga proizlazi iz činjenice da se operativni zahvati obavljaju i u tom položaju, a i zbog toga što neka područja kranija, koja su bila u dohvat robotu (za horizontalan položaj pacijenta) sad to više neće biti, a s druge strane, područja koja su robotima bila do sada nedostupna, sada će im biti unutar dosega. Također će se voditi računa i o tome da područje kranija bude na približno istome mjestu kao i u horizontalnome položaju, zbog fiksnog međusobnog položaja robota (Slika 5.15).



**Slika 5.15** Pozicija kranija za različite položaje pacijenta



**Slika 5.16** Putanja kretanja TCP-a alata robota KUKA po prostoru dok je pacijent u položaju od  $30^\circ$



**Slika 5.17** Putanja kretanja TCP-a alata robota Fanuc po prostoru dok je pacijent u položaju od  $30^\circ$

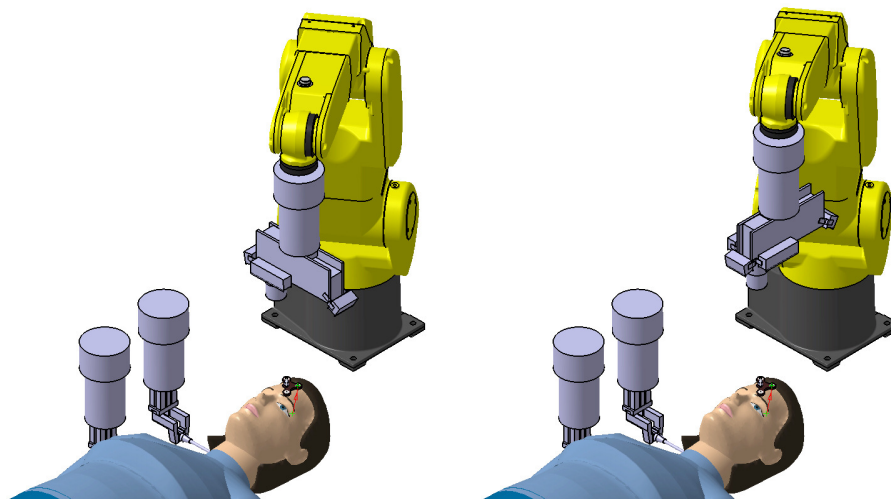


## 5.1. Simulacija i analiza operativnog zahvata

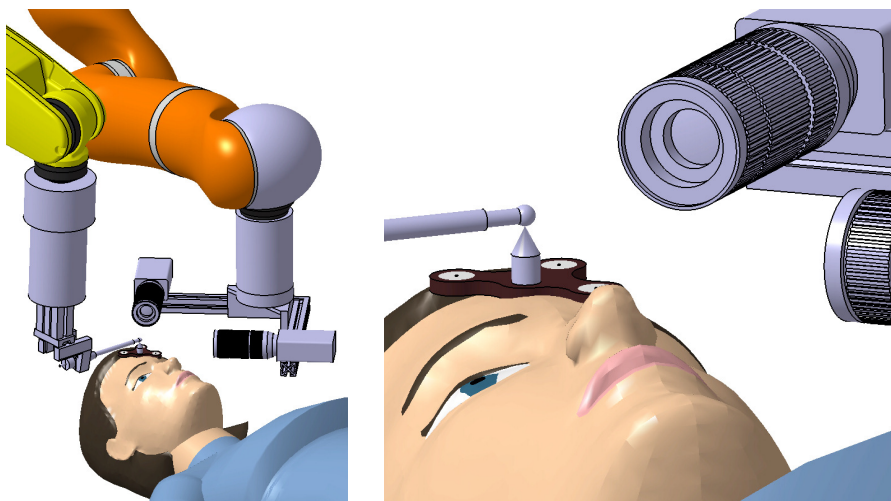
Nakon ispitivanja i verifikacije putanja alata i položaja pacijenta, može se pristupiti izradi simulacije operativnog zahvata. Kao operativni zahvat odabrana je

Sam redoslijed aktivnosti koje roboti moraju izvršiti kako bi operativni zahvat bio uspješno obavljen jest slijedeći:

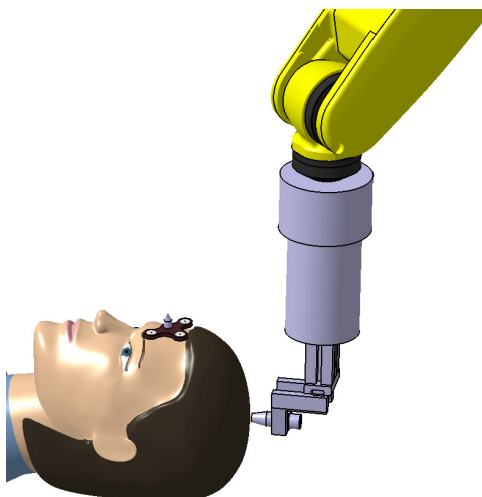
- 1 Fanuc dolazi na mjesto na kojem očekuje kalibracijsku pločicu te pali laser. (Slika 5.18)
  - Centar alata od lasera mora se nalaziti na pločici uz dopuštena odstupanja od  $\pm 10$  mm
  - Ako je izvan tolerancija postolje sa robotima se pomiče dok ne dođe unutar dopuštenih odstupanja
- 2 Kalibracijska pločica se lokalizira (Slika 5.18)
  - Laser se iteracijski postavlja paralelno sa pločicom
  - Centar alata se dovodi u ishodište pločice
- 3 FANUC mijenja alat te uzima kalibracijsku kuglu (Slika 5.19)
  - Postavlja kuglu točno iznad šiljka pločice
  - KUKA uzima stereovizijsku kameru
  - KUKA se pozicionira sa TCP-om alata (sjecište optičkih osi kamera) u vrh kalibracijskog šiljka
  - FANUC kompenzira eventualnu pogrešku u položaju.
- 4 KUKA se odmiče i ostavlja stereovizijsku kameru
- 5 FANUC odlaže kuglu
- 6 FANUC se pozicionira na mjesto operacije tj. tamo gdje će KUKA izvoditi bušenje (Slika 5.20)
- 7 KUKA uzima bušilicu te buši lubanju (Slika 5.21)
- 8 KUKA ostavlja bušilicu, uzima alat za primanje katetera, uzima kateter.
- 9 KUKA umeće kateter do unaprijed definirane dubine kroz vodicu u mozak pacijenta (Slika 5.22)
- 10 Kirurg pridržava kateter
- 11 KUKA otpušta kateter i odmiče se (Slika 5.23)
- 12 FANUC otvara vodicu te se odmiče (Slika 5.23)



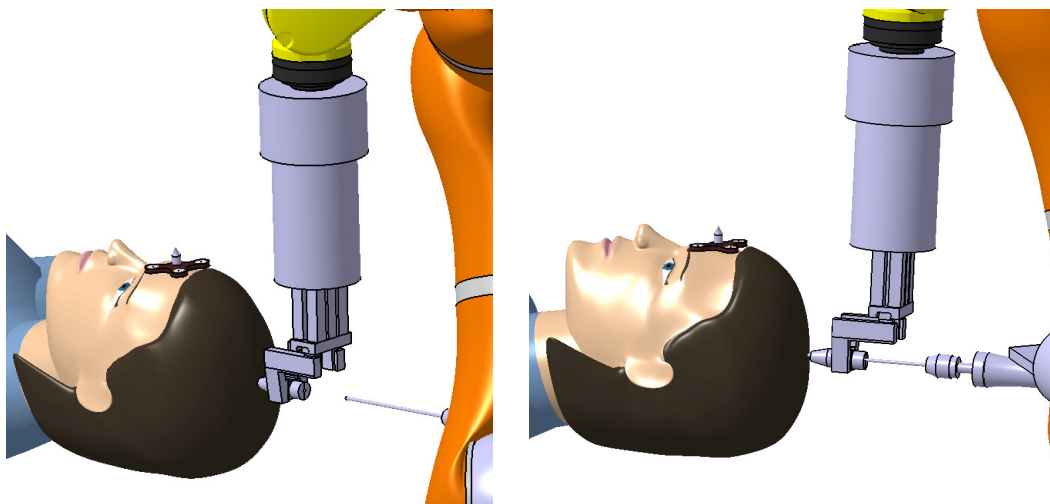
**Slika 5.18** Dolazak Fanuc-a iznad kalibracijske pločice, lokalizacija i poravnavanje



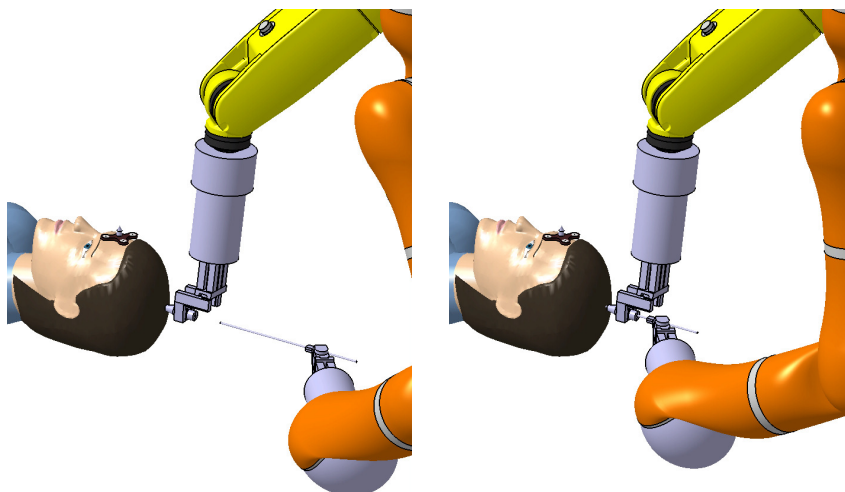
**Slika 5.19** Postavljanje kugle u vrh šiljka markerske pločice i kalibracija stereovizijskim sustavom



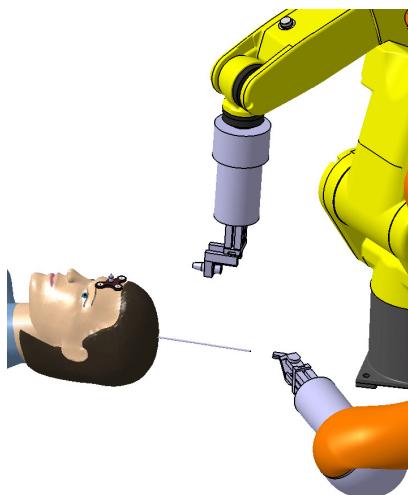
**Slika 5.20** Pozicioniranje Fanuc-a na mjesto operacije



**Slika 5.21** Kuka uzima bušilicu i buši lubanju



**Slika 5.22** KUKA uzima kateter i umeće ga kroz vodilicu u glavu pacijenta

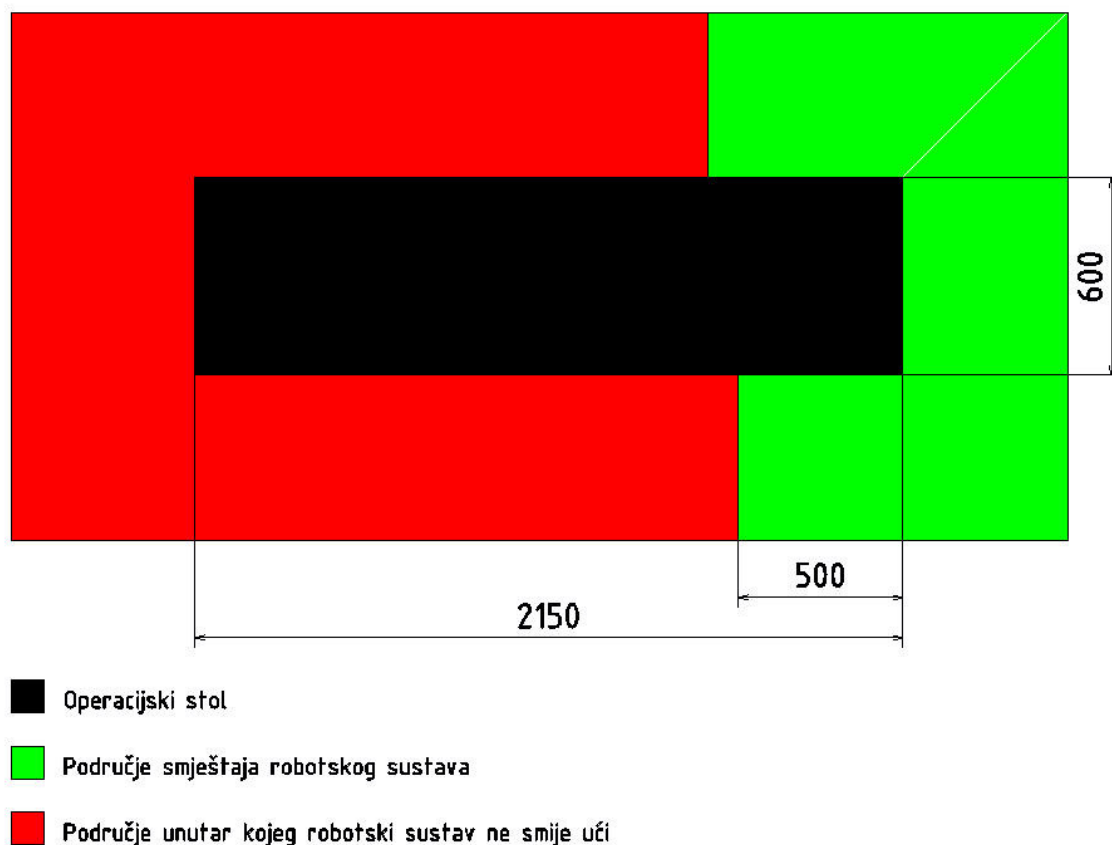


**Slika 5.23** KUKA i Fanuc se odmiču od katetera

## 6. DIZAJN I KONSTRUKCIJA MOBILNOG POSTOLJA ROBOTA

U ovom poglavlju, nakon što su verificirani modeli robota, alati, te njihove međusobne pozicije i pozicije robota u odnosu na pacijenta, razraditi će se različite varijante mogućih rješenja za postolje robota, izvršiti će se analiza pojedinih rješenja te će se odabrati najpovoljnije. Pri tome će se voditi iznimno računa o nekim konstrukcijskim ograničenjima kao što su:

1. Područje operativnog zahvata (pacijent) nalazi se na visini od 1 m iznad poda (+/- 5 cm).
2. Dimenzije postolja sa robotima ne smiju iznositi više od 2000 mm u visinu i 700 mm u širinu, radi mogućnosti prolaska kroz vrata operacijske sale.
3. Masa postolja bi trebala biti što manja radi olakšane manipulacije i transporta, što će se u potpunosti odvijati ručno.
4. Što veća krutost kako bi se vibracije svele na što je manje moguće.
5. Postolje se mora nalaziti u ograničenom prostoru oko operacijskog stola zbog drugih uređaja i opreme, nužnih za izvođenje operacijskog zahvata (zaузimati će dio kirurgova radnog prostora) (Slika 6.1).



*Slika 6.1 Područje smještaja robotskog sustava oko operacijskog stola*

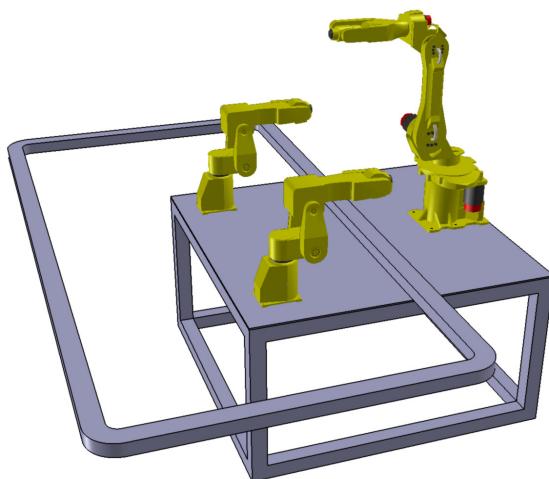
## 6.1. Varijante postavljanja robota

Što se tiče samog načina postavljanja robota na postolje, tu postoje tri osnovne varijante:

1. Stolna (horizontalna) postolja (*floor*)
2. Viseća postolja (*ceiling*)
3. Zidna postolja (konzolna) (*wall*)

### 6.1.1. Stolna postolja

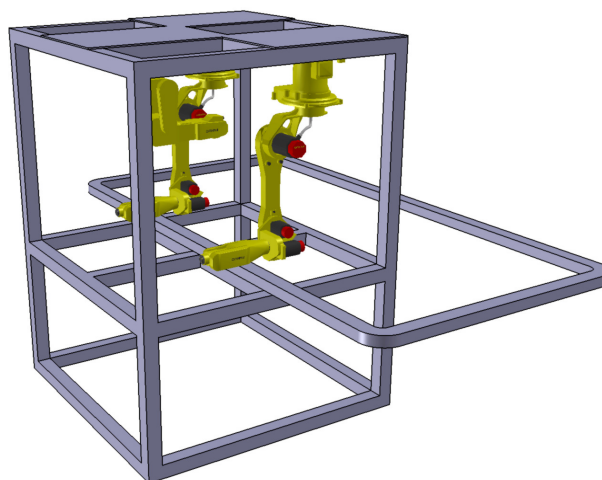
Stolna postolja su najjednostavniji način montiranja robota (Slika 6.2). Relativno su malih masa i dimenzija (zbog toga su i jeftinija), te ne zahtijevaju kruto vezanje sa podlogom za razliku od visećih i zidnih postolja, a robot se može opskrbljivati dijelovima za montažu sa više strana. Zbog toga što masa robota ne opterećuje stezne elemente, mogu raditi sa najvećom masom, te sa maksimalnim brzinama i ubrzanjima. Nedostatak je u tome što imaju manji radni prostor nego kod visećih i zidnih postolja.



Slika 6.2 Stolno postolje

### 6.1.2. Viseća postolja

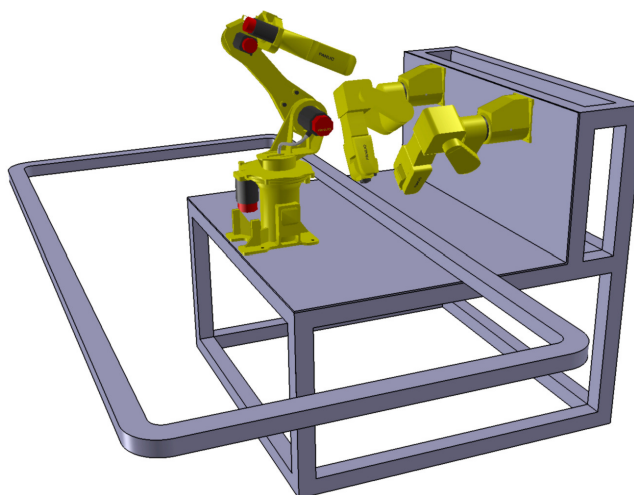
Viseća postolja se baziraju na tome da je robot montiran tako da visi prema dolje (Slika 6.3). Prednost visećih postolja je u tome što je robotu omogućen znatno veći radni prostor, i s obzirom da radi u relativno ispruženom položaju preciznost izvođenja operacija je veća, kao i manevarske sposobnosti kod umetanja kompliciranih dijelova. Nedostatak je u tome što su viseća postolja znatno viša od stolnih, pa je i krak na kojemu djeluje sila robota veći, što neminovno povećavaju moment (točka u kojoj djeluje sila je mjesto gdje je robot pričvršćen za postolje a oslonac je mjesto gdje postolje dodiruje pod) i vibracije. Upravo zbog toga ta postolja moraju biti robusna, masivna i naravno kruto vezana za podlogu.



**Slika 6.3** *Viseće postolje*

### **6.1.3.            *Zidno (konzolno) postolje***

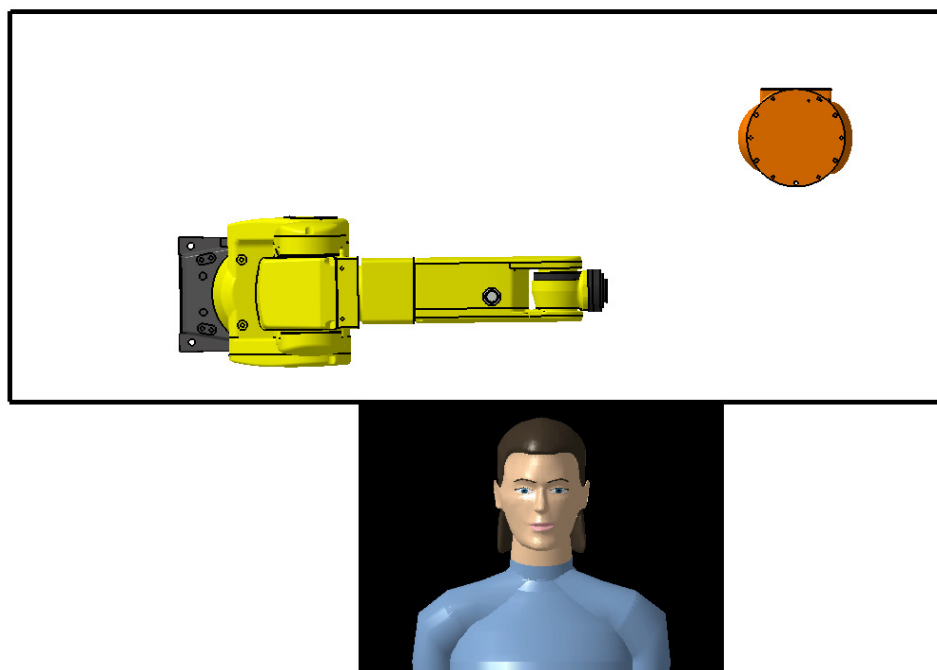
Na zidna ili konzolna postolja robot se postavlja najčešće pod kutom od  $90^\circ$  (Slika 6.4). Ta postolja robotu pružaju najveći radni prostor od svih ostalih postolja (visećih i stolnih), robot lako može izvoditi kompleksne operacije umetanja odozgo prema dolje. Još jedna prednost zidnih postolja je ta što se robot može montirati direktno na zid (dovoljno je da se ploča koja će nositi robota učvrsti na zid) što ujedno znači puno manje i lakše postolje te i jednostavnija konstrukcija. No međutim, zbog pozicije montiranja robot može uzimati samo dijelove koji su ispred njega. Također u steznim elementima kojima je robot pričvršćen na postolje dolazi do znatnog povećanja naprezanja (javlja se statički moment koji je uzrokovan masom robota i kojeg nema kod postavljanja na viseća i stolna postolja) što rezultira smanjenjem mase tereta kojim robot može rukovati i naravno nužnih smanjenjem brzina i ubrzanja osi robota.



**Slika 6.4** *Zidno (konzolno) postolje*

## 6.2. Dizajn i konstrukcija postolja

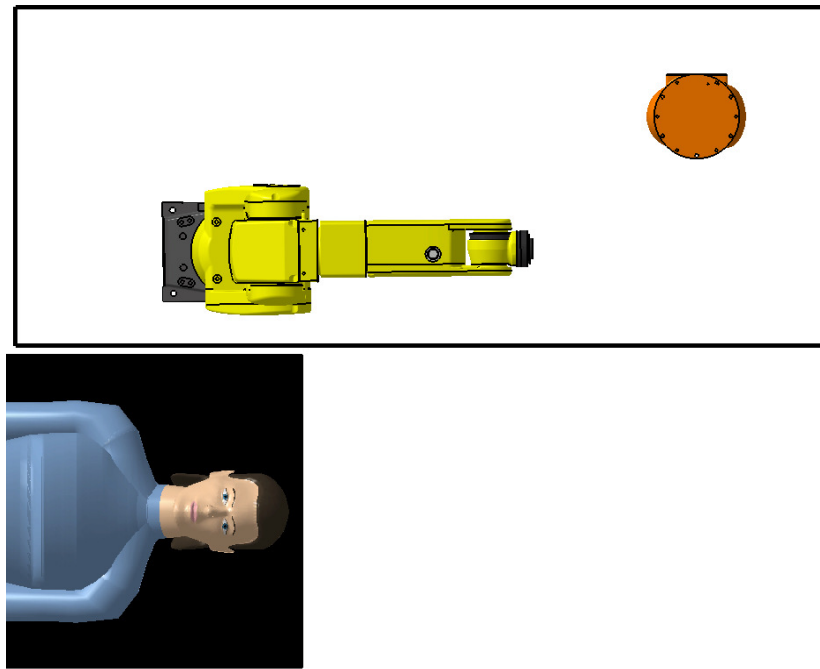
Kao što je već rečeno, prilikom dizajniranja i konstruiranja postolja voditi će se računa o dimenzijama i čvrstoći postolja, no međutim, treba voditi računa i o svim dodatnim elementima koji moraju biti implementirani u sustav. Prvo će se odrediti gabariti postolja (za sada samo širina i dužina, visina velikim dijelom ovisi i o pozicijama robota). Također treba vidjeti i donijeti odluku da li će se postolja morati raditi odvojeno, da li će se kasnije spajati ili će se odmah krenuti u izradu jednog kompaktnog postolja. To će se pitanje moći dati odgovor tek nakon što se definiraju gabariti okvira postolja i da li elementi sustava (roboti) stanu unutar tih gabarita (Slika 6.5). Naravno, prednost uvijek treba dati jednostavnijim rješenjima, što u ovome slučaju znači da će se gledati da postolje bude kompaktno, kako bi se izbjegli komplicirani sustavi spajanja i uručivanja postolja, te kako bi se izbjeglo stalno uspostavljanje komunikacije između robota. Ali isto tako treba voditi računa o tome da su ipak zadovoljeni svi tehnički i sigurnosni aspekti koji su nužni kako bi sustav mogao funkcionirati bez opasnosti za ljude i okolinu.



**Slika 6.5** Položaj postolja iza operacijskog stola i razmještaj robota na postolju

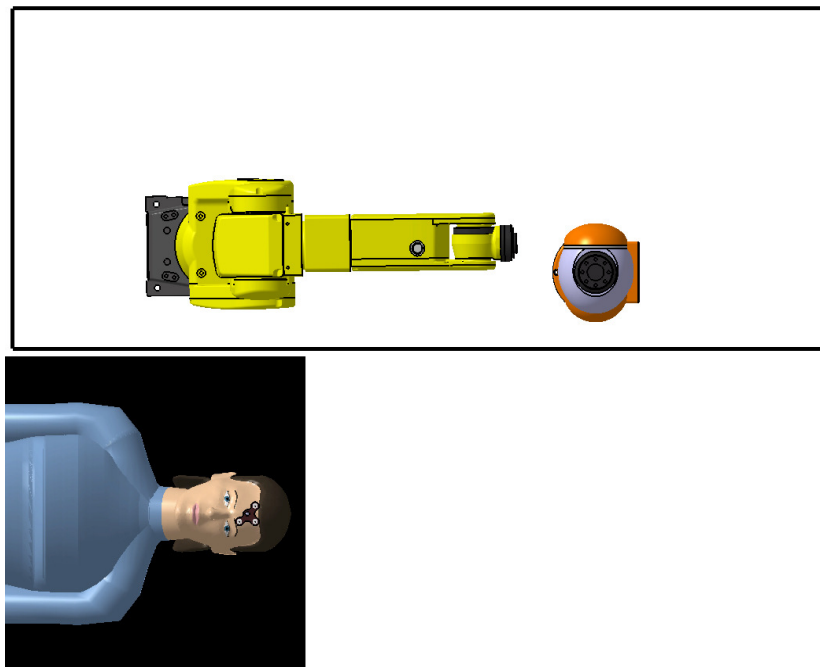
Kao što je vidljivo, postolje odgovara maksimalno dopuštenoj širini od 700 mm, no međutim, potrebno je još provjeriti da li stanu svi potrebni elementi sustava (upravljačke jedinice, upravljačko računalo, sustav za transport postolja, pročišćivači zraka i sl.) što može još dodatno utjecati na same dimenzije i izvedbu postolja.

Naravno, ovakva pozicija postolja sa robotima onemogućava pristup liječnicima i osoblju području zahvata i zbog toga će se razmotriti još neke od mogućih pozicija postolja i rasporeda robota na postolju. Najbolja pozicija bi bila kada bi se postolje nalazilo sa strane pored kreveta, i time omogućavalo direktan pristup lijeničkom osoblju k pacijentu za vrijeme izvođenja operativnog zahvata (Slika 6.6).



**Slika 6.6** Položaj postolja pored operacijskog stola i razmještaj robota na postolju

Ovakav položaj postolja je puno povoljniji jer sada medicinsko osoblje ima potpuni pristup pacijentu i zoni operacijskog zahvata, no međutim, treba vidjeti da li je pacijent i robotima još uvijek unutar dohvata. Nakon evaluacije i ispitivanja putanja, ustanovljeno je da je pacijent unutar dosega Fanuc-a, no međutim KUKA više ne može doseći do zone zahvata, i ono što će se morati razmotriti jest nova pozicija i eventualno orijentacija tog robota (Slika 6.7).



**Slika 6.7** Položaj postolja pored operacijskog stola i novi razmještaj robota na postolju

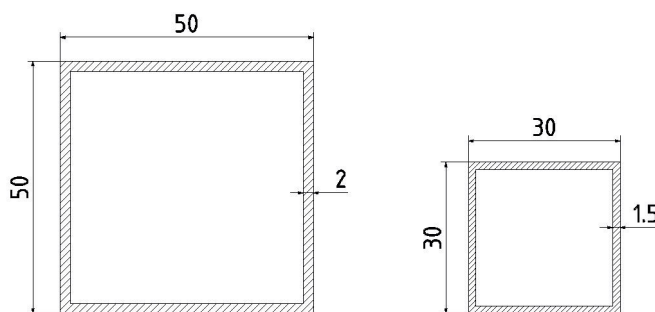


Nakon evaluacije i verifikacije novog položaja postolja i robota, donesena je odluka o novom rasporedu robota koji iz ove pozicije mogu pristupiti cijelom kranijalnom području. Fanuc-ova baza i dalje ostaje na istoj visini, a položaj u odnosu na pacijenta neznatno mu se mijenja. Kuka s druge strane ima promijenjenu i orijentaciju (više nije u visećem položaju nego je postavljena na stol), i skroz je primaknuta pacijentu.

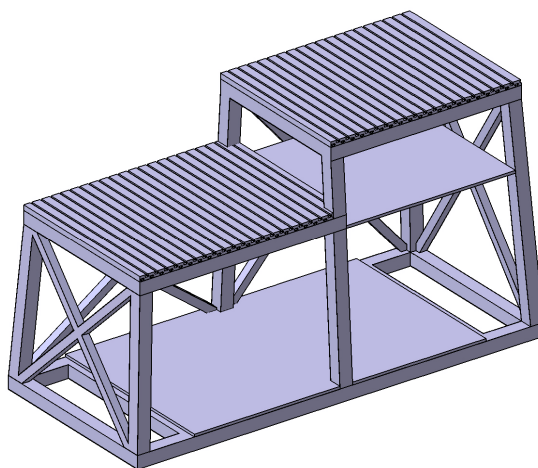
### 6.2.1. Okvir postolja

Nakon što su definirane pozicije i orijentacije robota i postolja, te poznati gabariti može se pristupiti izradi okvira postolja. Okvir je dio koji će najviše nositi cijelu konstrukciju i za njega je od iznimne važnosti da bude čvrst, ali i krut kako bi se smanjile vibracije. Za materijal od kojeg će se izrađivati okvir odabran je INOX čelik, koji osim svojih odličnih mehaničkih svojstava posjeduje i neka druga svojstva kao što su visoka otpornost na koroziju, otporan na kemikalije i dezinficijense, te estetski je vrlo prihvatljiv (može se polirati do visokog sjaja).

Profili od kojih će se izrađivati okvir postolja su pravokutne cijevi dimenzija 50×50×2 mm i 30×30×1,5 (Slika 6.8) mm koje će se koristiti kao dodatna poprečna ojačanja cijele konstrukcije (Slika 6.9). Okvir konstrukcije biti će nerastavljivo spojen zavarivanjem (TIG postupkom) jer vijčani spojevi spadaju u skupinu rastavljivih spojeva i kod njih se uvijek javlja neki maleni pomak na samome mjestu spajanja, što u konačnici rezultira relativno malom krutošću samoga postolja.



Slika 6.8 Profili INOX cijevi za okvir postolja



Slika 6.9 Okvir postolja sa tablama

### 6.2.2. *Transport i manipulacija postolja sa robotima*

Još jedna bitna stavka kod izrade postolja jest mogućnost transporta i manipulacije cijelim sustavom. Postoji veliki broj mogućih transportnih i manipulacijskih rješenja, naravno, ono najlogičnije i najprihvatljivije jest da transportni sustav bude integriran u samo postolje (ugrađeni kotači).

Naravno, tijekom operativnog zahvata, postolje ne bi smjelo ostajati na kotačima, jer to bi smanjilo stabilnost cijeloga sustava (za vrijeme operacije moglo bi doći do pomicanja postolja što bi rezultiralo kobnim posljedicama po zdravlje ili život pacijenta). Dva su moguća rješenja ovoga problema:

1. Postolje se nalazi na kotačima, a kada dođe na mjesto operacije postolje se podiže na stope i podiže kotače u zrak.
2. Sustav podiže kotače i spušta postolje na stope koje su kruto vezane za samo postolje.

Oba dva su rješenja izgledna, no treba dobro promisliti da li je jedno rješenje bolje od drugoga i koje je to. Kod oba dva rješenja, jedna je eminentan problem, a to je zakazivanje sustava, tj. ako se postolje počne spuštati ne planirano. U prvom slučaju, to bi bilo nepoželjno, jer bi se postolje na stopama nalazilo za vrijeme operativnog zahvata, i takvo zatajenje sustava podizanja bi opet moglo završiti sa kobnim posljedicama. U drugom slučaju (kada se kotači spuštaju i podižu postolje) ako dođe do zatajenja, pa se sustav počne neplanirano spuštati, može se dogoditi jedino prilikom transporta, dakle kada nije ugrožen život pacijenta. Na temelju ovih zaključaka, neminovno je donesena odluka da će se odabrati drugo rješenje, tj. kada se kotači spuštaju i podižu postolje radi transporta.

Slijedeće što treba odlučiti, jest način na koji će se kotači spuštati. I tu postoji niz rješenja, od samog načina podizanja (ručno ili pomoću motora), pa do sustava podizanja. Najčešći sustavi za dizanje tereta su:

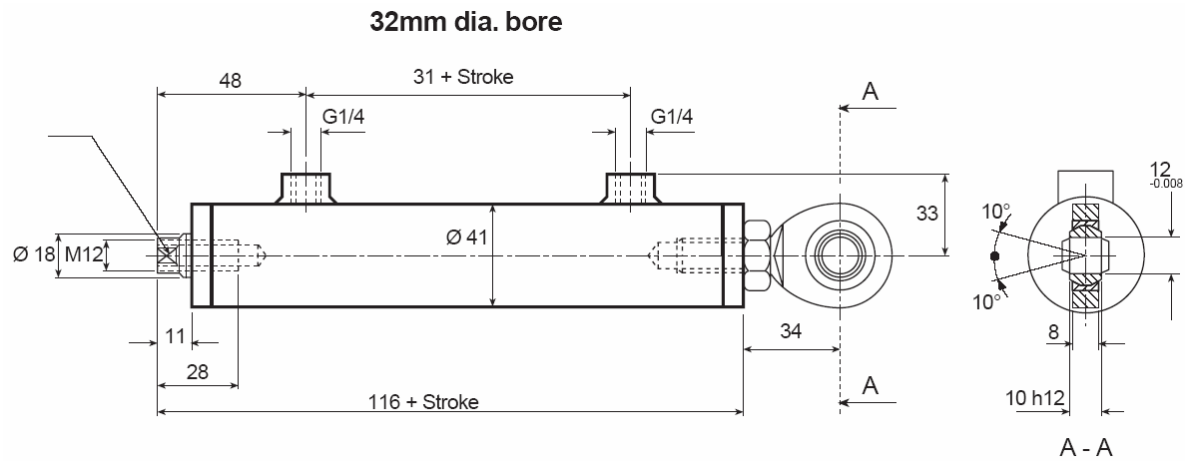
1. Navojna vretena
2. Pneumatski cilindri
3. Hidraulički cilindri

Prednost navojnih vretena je u tome što ne koriste nikakve medije, što je od velike važnosti radi očuvanja sterilnosti sustava i okoline. No međutim, da bi se na takav način podigli tereti većih masa potrebna je velika energija (velika ručna sila ili elektromotori velikih snaga) što ih čini dosta nepovoljnima.

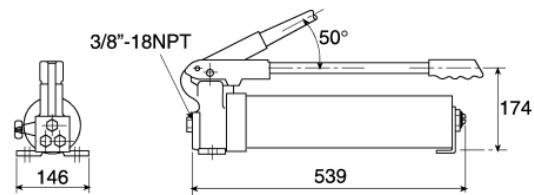
Pneumatski cilindri, za razliku od navojnih vretena, ne zahtijevaju toliko veliku energiju kako bi podigli teret, a još i k tome koriste zrak kao medij, što ih čini povoljnima za rad u sterilnim okolinama. No međutim, kod podizanja tereta većih masa, stlačivost samog medija (zraka) može predstavljati problem.

Hidraulički cilindri s druge strane, nemaju problema sa stalčivosti radnog medija (koriste fluid koji je nestlačiv), a opet ne zahtijevaju izvore velike snage kako bi podigli teške terete. No međutim, njihov je problem u tome što s vremenom može doći do istjecanja medija van sustava što ih čini vrlo nepovoljnima za rad u sterilnim okolinama kao što je operacijska sala.

Za naš su sustav odabrani Bosch Rexroth-ovi hidraulički cilindri (Slika 6.10) i Enerpacova hidraulička ručna pumpa (Slika 6.11), ali će se prilikom projektiranja velika pozornost obratiti na to da se sustav izolira od okoline, kako u slučaju istjecanja radnog medija (ulja) ne bi došlo do kontaminacije okoliša (operacijske sale).

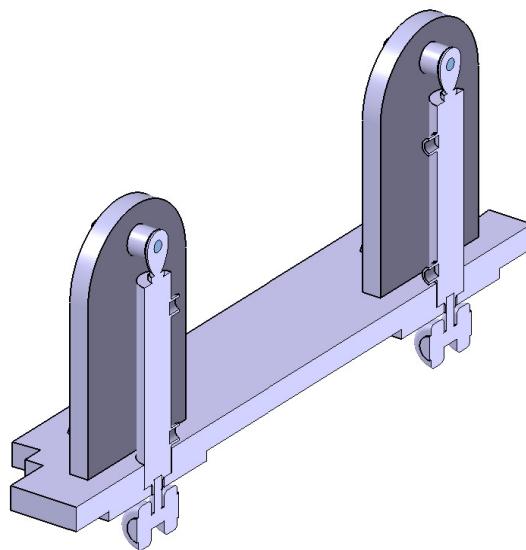


**Slika 6.10** Rexrothov hidraulički cilindar Ø32<sup>[9]</sup>



**Slika 6.11** Enercapova hidraulička ručna pumpa<sup>[9]</sup>

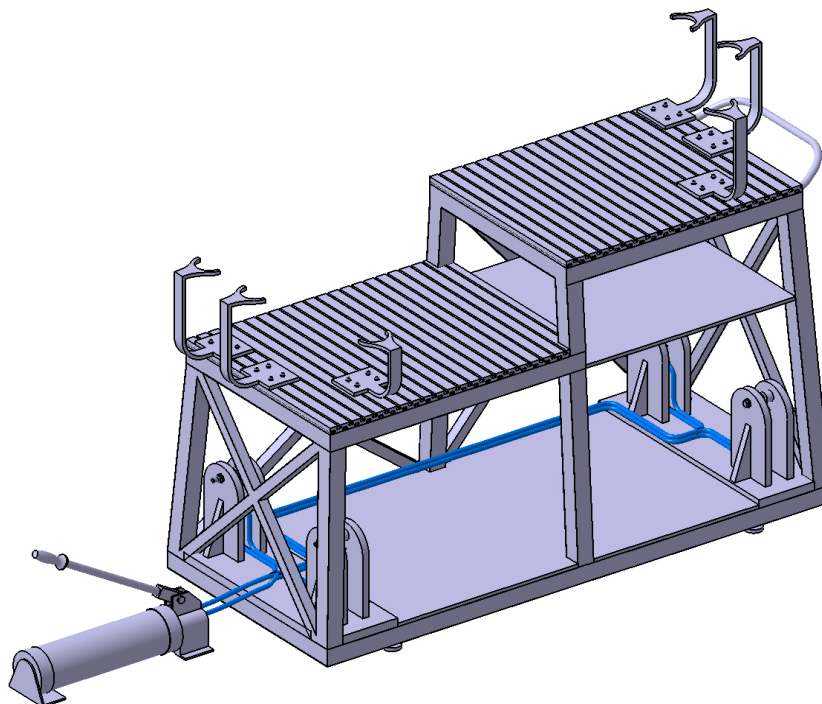
Nakon odabira hidrauličkih komponenti, potrebno je odrediti njihovu poziciju unutar postolja, te konstruirati nosače i kućišta na koja će cilindri biti pričvršćeni radi podizanja cijeloga postolja (Slika 6.12). Pri izradi treba voditi računa o čvrstoći i nosivosti samih kućišta, ali opet treba paziti da ne zauzimaju previše prostora za druge elementa sustava.



**Slika 6.12** Nosači i kućište hidrauličkih cilindara

### 6.2.3. Ostali elementi sustava

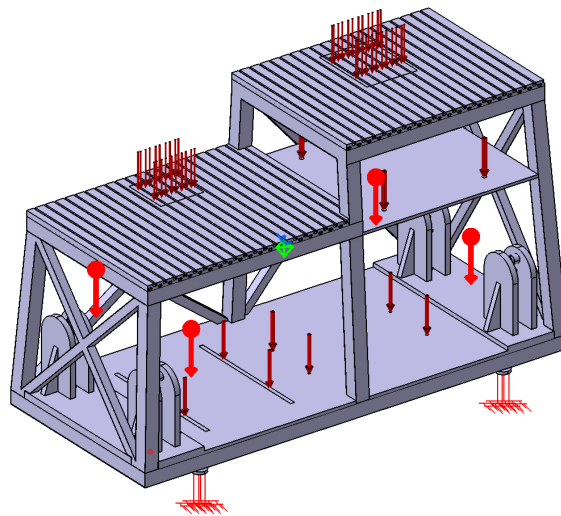
Nakon što je dizajniran transportni sustav postolja, može se krenuti sa razmještajem dodatnih elemenata nužnih za funkcionalnost cijeloga sustava. U to ulaze upravljačke jedinice, osobno računalo sa kontrolnim sučeljem (monitorom), držači alata, te rukohvat za manipulaciju i transport postolja. U ovome segmentu je bitno iskoristiti svaki mogući prostor unutar same konstrukcije, kako bi ona bila što manja i kompaktnija, što u konačnici rezultira i manjom masom cijelog sustava, manjim prostorom potrebnim za skladištenje i olakšanom manipulacijom sustavom. Također će se voditi i računa o ergonomskom dizajnu i razmještaju elemenata namijenjenih za upravljanje sustavom (Slika 6.13).



Slika 6.13 Mobilno postolja

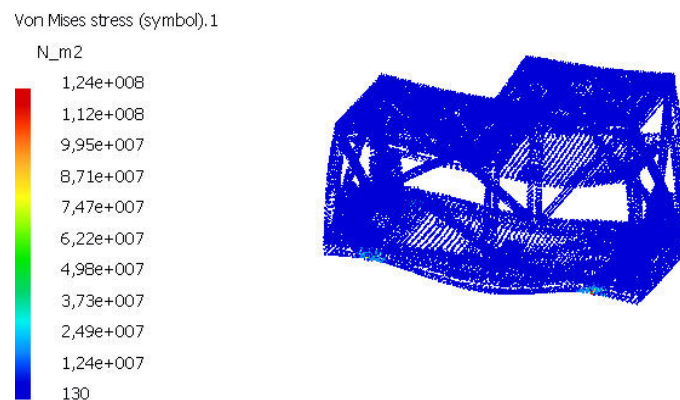
## 6.3. Proračun čvrstoće i vlastitih frekvencija postolja

U ovome dijelu će se proračunati čvrstoća i vlastite frekvencije postolja. To će biti napravljeno u *Generative Structural Analysis* modulu, u kojemu se pomoću metode konačnih elemenata mogu ispitati statička i dinamička naprezanja. Postupak se sastoji od toga da se definiraju oslonci nosača te sile koje djeluju na njega sa svojim iznosima (Slika). U ovom slučaju sile će predstavljati masu kojom roboti i upravljačke jedinice djeluju na postolja u stanju mirovanja, kao i masa samog postolja. Iz proračuna, radi pojednostavljenja, izbaciti će se svi elementi koji nemaju značajan utjecaj na čvrstoću ili opterećenje samoga postolja (držači alata, rukohvat i sl.) (Slika 6.14).

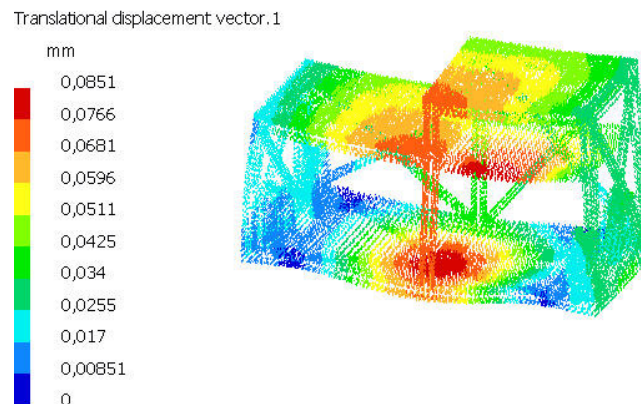


**Slika 6.14** Pojednostavljeni oblik postolja sa silama i osloncima

Iz FEM analize može se vidjeti koja mjesta na postolju najviše opterećena (Slika 6.15) i deformacije postolja (Slika 6.16) i iznosi njihovi iznosi. Na temelju tih rezultata može se donijeti procijena o eventualnim promjenama dimenzija profila nosača.



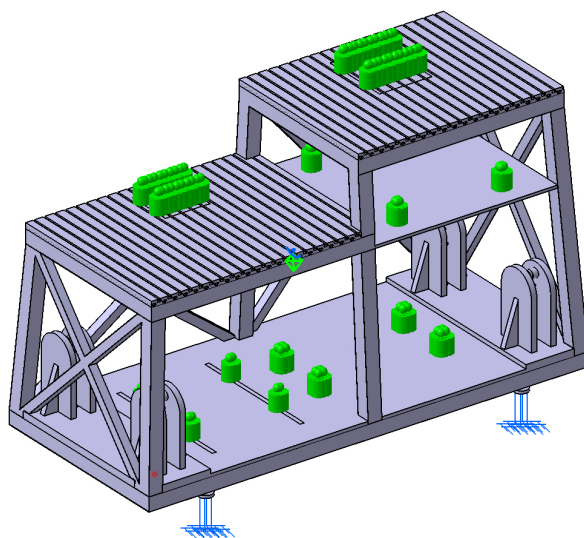
**Slika 6.15** Von Misesova naprezanja



**Slika 6.16** Raspored deformacija na postolju

Iz provedene analize vidljivo je da najveće deformacije iznose 0,085 mm što je zadovoljavajuće i može se smatrati da je cijela konstrukcija stabilna.

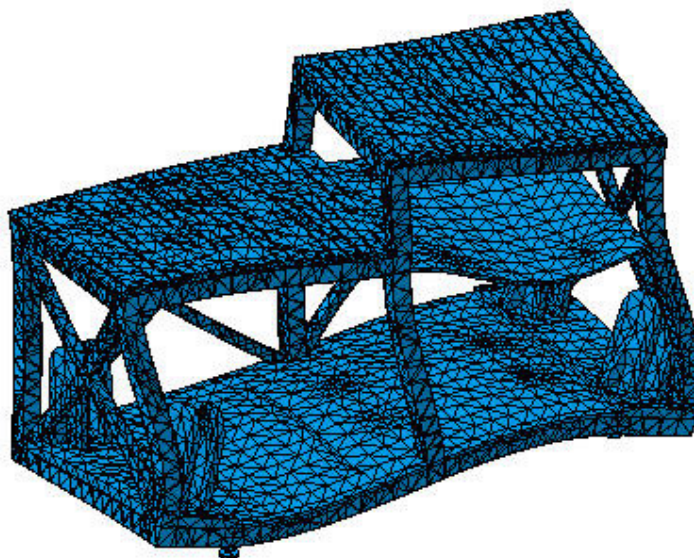
Slijedeće što će se napraviti jest proračun vlastitih frekvencija postolja (Slika 6.17). Za vrijeme izvršavanja operacija roboti su u stvari masa koja ima svoje brzine i ubrzanja, u različitim smjerovima, pa se javljaju vibracije sustava. Zbog toga će se provesti analiza vibracija sustava kako bi se dao odgovor na pitanje koji su iznosi vlastitih frekvencija sustava. Ovoga puta elementi koji su u dosadašnjem proračunu predstavljali opterećenje, sada će djelovati kao dodatna prigušna masa.



Slika 6.17 Raspored masa na postolju

Sensor Name	Sensor Value
Frequency	39,093Hz
	45,678Hz
	66,559Hz
	86,075Hz
	90,912Hz
	113,597Hz
	124,792Hz
	136,534Hz
	140,564Hz
	149,424Hz

Tablica 6.1 Vlastite frekvencije sustava



**Slika 6.18** Postolje pri frekvenciji od 86,075 Hz

Frekvencije dobivene ispitivanjem postolja (Tablica 6.1) su frekvencije u kojima sustav rezonira i izazivaju fatalne lomove i deformacije sustava (Slika 6.18), te bi ih s toga u svakome slučaju trebalo izbjegavati.

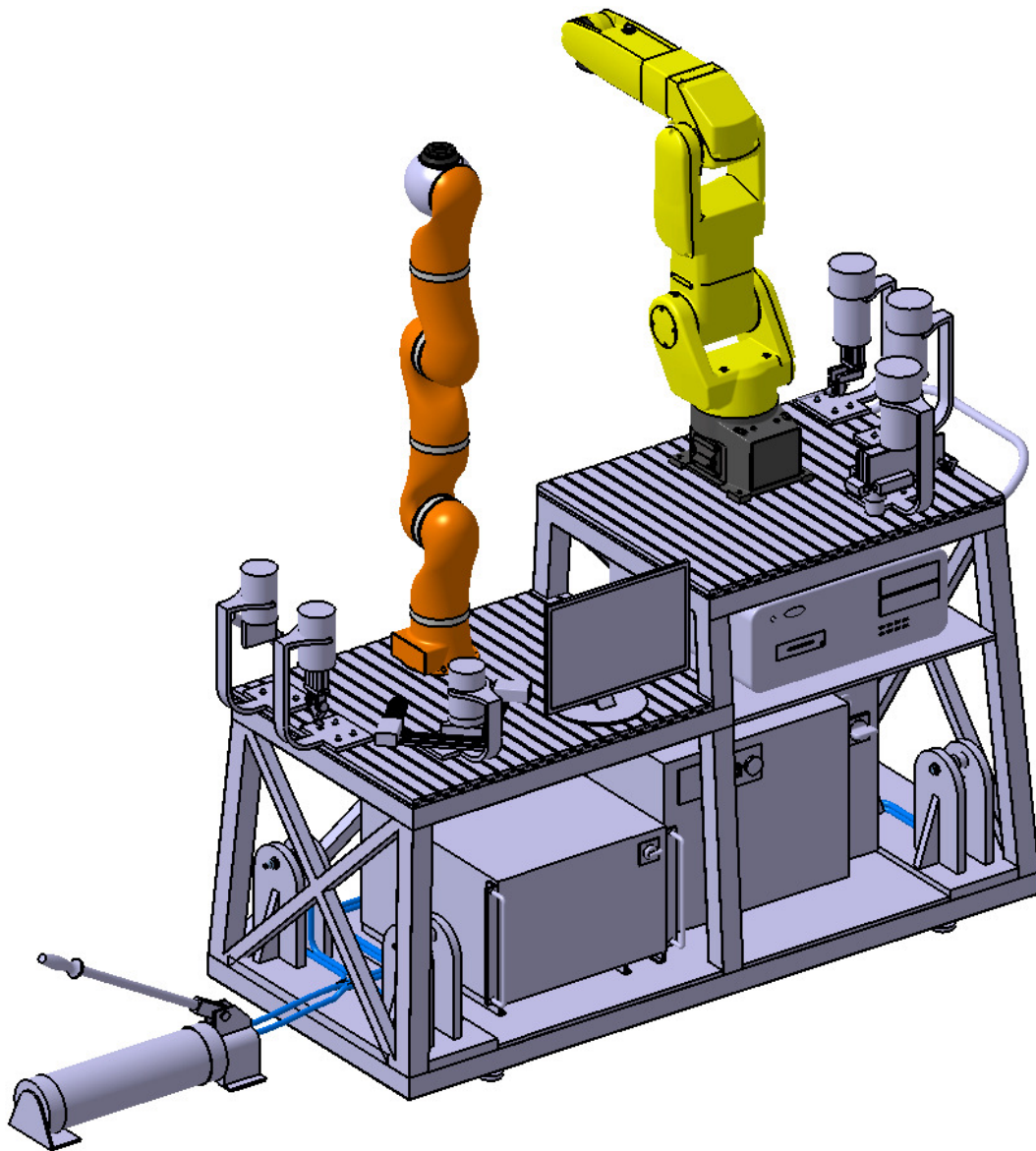
#### **6.4. Raspored i dimenzije elemenata dvoagentnog robotskog neurokirurškog sustava**

Nakon što su definirani svi elementi koji će činiti ovaj neurokirurški robotski sustav, potrebno ih je pozicionirati unutar postolja (Slika 6.19). Elementi koji će činiti ovaj robotski neurokirurški sustav su slijedeći:

- 1 Robot KUKA LBR4
- 2 Robot Fanuc LR Mate 200iC5L
- 3 Upravljačka jedinica KUKA KRC2 lr
- 4 Upravljačka jedinica R-30iA Mate
- 5 Korisničko upravljačko računalo sa ulazno izlaznim komponentama (tipkovnica, miš, monitor)
- 6 Kamera sa laserskim senzorom
- 7 Stereovizijski sustav
- 8 Kalibracijska kugla
- 9 Vodilica za svrdlo i kateter
- 10 Kirurško svrdlo
- 11 Kateter
- 12 Postolje koje je sačinjeno od:



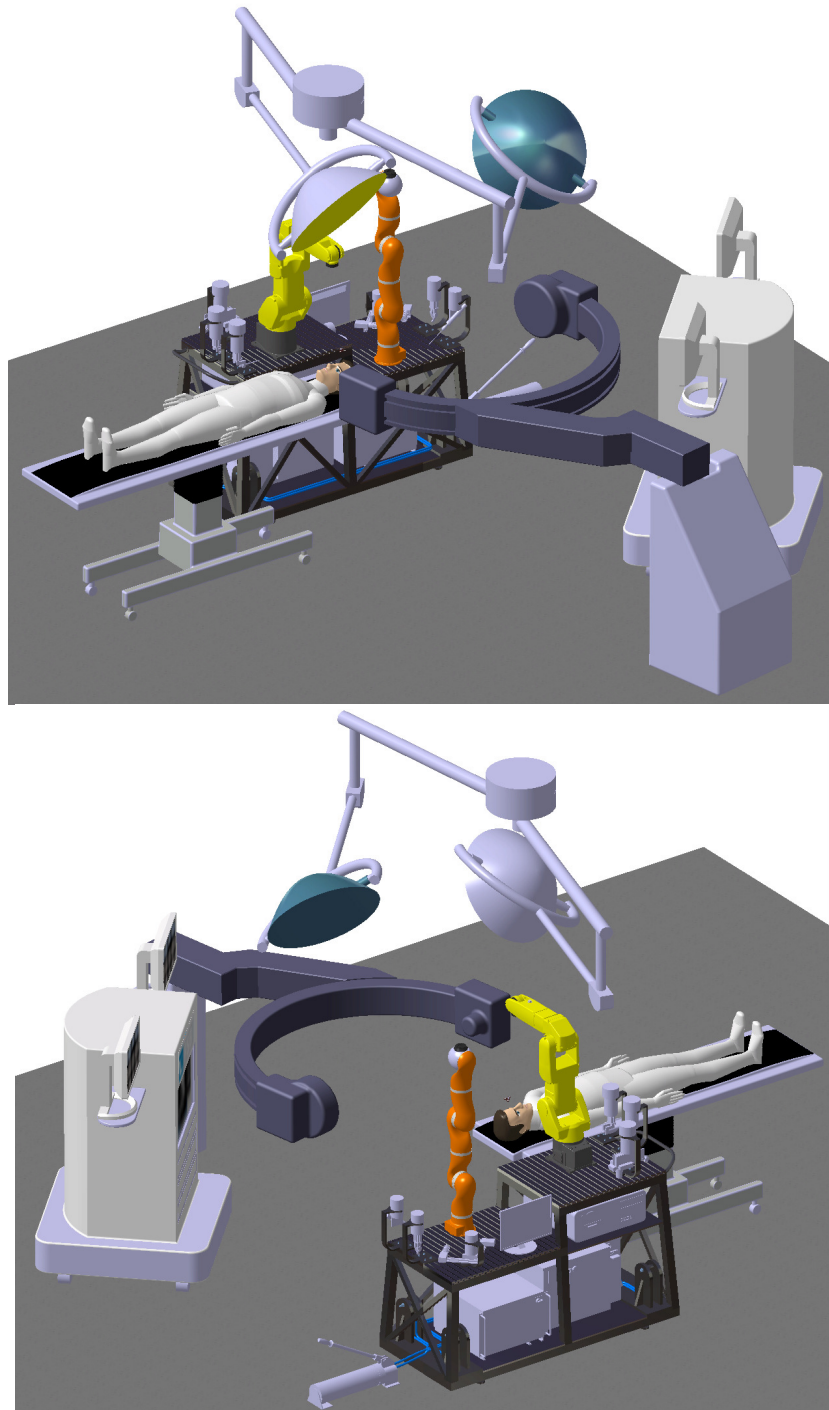
- Nosećeg okvira
- Tabli postolja
- Stope postolja
- Rukohvata
- Hidrauličkog transportnog sustava (hidraulički cilindri, kotači, nosači i kućišta hidrauličkih cilindara, distanceri)
- Hidraulička ručna pumpa i crijeva za protok radnog medija
- Razni spojni elementi (vijci, matice, podložne pločice, svornjaci, uskočnici i dr.)



**Slika 6.19** *Robotski neurokirurški sustav*



Još je preostao samo jedan korak, a to je ubaciti robotski sustav u okružje neurokirurške operacijske dvorane, kako bi se mogla vidjeti i analizirati interakcija sustava sa ostalim elementima koji su neophodni za uspješno obavljanje operativnih zahvata (Slika 6.20).



**Slika 6.20** Položaj robotskog neurokirurškog sustava unutar operacijske dvorane

## 7. ZAKLJUČAK

Kao što je već i rečeno, neurokirurški roboti imaju značajne izvedbene prednosti u odnosu na neurokirurge; pouzdaniji su u izvođenju kompleksnih i složenih procedura više puta za redom, bez umora, velikih varijacija u izvođenju, te bez pada koncentracije uzrokovanog umorom ili višestrukim ponavljanjem iste radnje. Posjeduju gotovo savršenu preciznost, otporni su na rad u opasnim okolinama (imaju „savršen“ imunitet na sve biološke agense i veliku većinu kemijskih), i mogu raditi kroz vrlo uske i dugačke kirurške prolaze, što ih čini idealnim alatima za zahvate na mozgu. Roboti također mogu vidjeti dijelove područja zahvata pod kutovima koji su izvan vidnog područja kirurga za vrijeme operacije i na neki način, roboti značajno proširuju vizualne i manipulacijske sposobnosti neurokirurga iznad njihovih prirodnih granica.

U ovome je radu dizajnirano i konstruirano postolje za jedan takav robotski sustav sa svim pratećim elementima, nužno neophodnima za njegovo funkcioniranje i uspješno obavljanje operacijskih zahvata u neurokirurgiji. Za potrebe konstruiranja postolja, te da bi ono imalo punu funkcionalnost, provedene su mnogobrojne simulacije ispitivanja putanja kretanja robota prilikom izvođenja operativnih zahvata, te su odabrane najpovoljnije pozicije robota, u kojima se ne bi međusobno ometali, niti bi smetali medicinskom osoblju ili medicinskim uređajima u operacijskoj dvorani.

Nakon svih provedenih analiza i simulacija dvoagentnog robotskog neurokirurškog sustava, i nakon dobivenih rezultata, može se slobodno reći da sustav zadovoljava sve zadane uvjete, kako funkcionalne, tako i dimenzijske i strukturalne. Cilj od samoga početka je bio da se napravi jedna kompaktna cjelina, unutar koje će djelovati i međusobno komunicirati dva robota sa svim svojim alatima. Također je i od ključne važnosti bilo dizajnirati postolje koje će biti transportabilno i lako upravljivo. Također se cijelo vrijeme tijekom izrade ovoga rada posebna pozornost posvećivala sigurnosnim aspektima, kako za pacijenta tako i za medicinsko osoblje koje će također djelovati u neposrednoj blizini ovoga sustava.

Od velike pomoći pri izradi ovoga rada su bili i napredni i moćni programski paketi, kao što su CATIA i DELMIA, koji u svojim sučeljima nude uistinu napredne alate, sve u svrhu verificiranja jednog kompleksnog i zahtjevnog sustava kao što je ovaj. To podrazumijeva razne simulacije kretanja robota po prostoru, analize naprezanja i deformacija nosećih dijelova postolja, i to sve sa iznimno visokom preciznošću.

## 8. LITERATURA

- [1] Vladimir J. Šimunović: Neurokirurgija, Split, 2005.
- [2] M. Sam Eljamel: Robotic Applications in Neurosurgery, Department of Neurosurgery, The University of Dundee, Scotland UK, 2008.
- [3] Fanuc Robotics UK: [www.fanucrobotics.co.uk](http://www.fanucrobotics.co.uk)
- [4] Kuka: [www.kuka-robotics.com/germany/en](http://www.kuka-robotics.com/germany/en)
- [5] Basler: [www.baslerweb.com](http://www.baslerweb.com)
- [6] Tamron: [www.tamron.co.jp](http://www.tamron.co.jp)
- [7] Acuity: [www.acuitylaser.com](http://www.acuitylaser.com)
- [8] Edmund Optics: [www.edmundoptics.com](http://www.edmundoptics.com)
- [9] Bosch Rexroth: <http://uk.rs-online.com/web/>